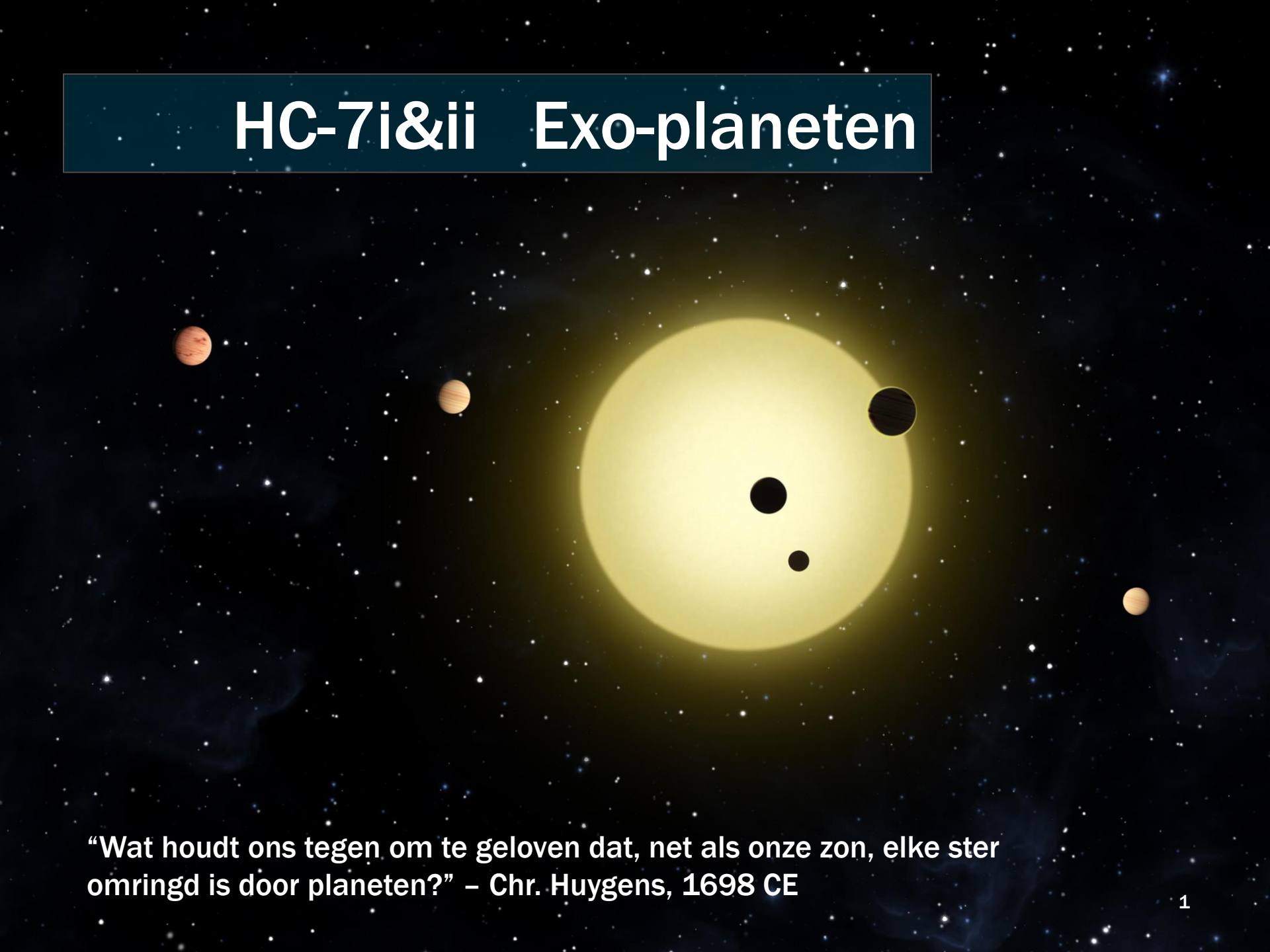
HC-7i&ii Exo-planeten



“Wat houdt ons tegen om te geloven dat, net als onze zon, elke ster omringd is door planeten?” – Chr. Huygens, 1698 CE

DE EERSTE DETECTIES

- Zoektocht naar exo-planeten heeft meerdere keren tot foute interpretatie metingen geleid.
- Veel effecten moeten worden meegenomen, om zeker te zijn dat een meting van bv. een periodieke verandering van het zwaartepunt ook daadwerkelijk door een planeet wordt veroorzaakt.

- Bv. signaal te wijten aan systematisch effect in telescoop waarvoor niet (of onvoldoende) gecorrigeerd was

Voorbeeld: Barnard's ster. Astrometrie op fotografische platen suggereerde oscillatie t.g.v. 1.6 M_{Jup} planeet

→ Oorzaak: onderhoud aan optiek telescoop in zelfde periode.

DE EERSTE DETECTIES

- 1991/1992: de eerste exo-planeten ontdekt bij pulsar
- Pulsar timing: Variatie in aankomsttijd pulsar-signalen geeft omlooptijd van pulsar rond pulsar-planeet massa-middelpunt.
- Twee planeten, van >2.8 en >3.4 Maarde, maar: zijn dit oude planeten rond deze neutron ster die supernova explosie hebben overleefd, of zijn ze gevormd uit de ejecta van de supernova?
- 1994: de eerste exo-planeten bij reguliere ster.
- 1999: het eerste exo-planeten stelsel is een feit.
- 2006: waarneming van een exo-planeten stelsel zonder Jupiter-achtige planeten.
- Anno 2015 een groot aantal exo-planeten (stelsels) ontdekt met gebruikmaking van verschillende detectie technieken.

DETECTIE EXO-PLANETEN

Vijf standard detectie methodes (met voor- en nadelen)

1) Astrometrie

Kijk naar een (regelmatige) schommeling van de positie van een ster rond het massa middelpunt van een ster plus planeet.

2) Doppler variatie

Kijk naar de schommeling van spectrale sterlijnen, omdat de radiele snelheid van de ster a.g.v. de zwaarte-kracht van een begeleidende planeet verandert.

3) Transit methode (Hot Jupiters)

Kijk naar de lichtcurve van een ster; bij geringe inclinatie is er een primair minimum te zien op het moment dat een planeet 'voorlangs' beweegt.

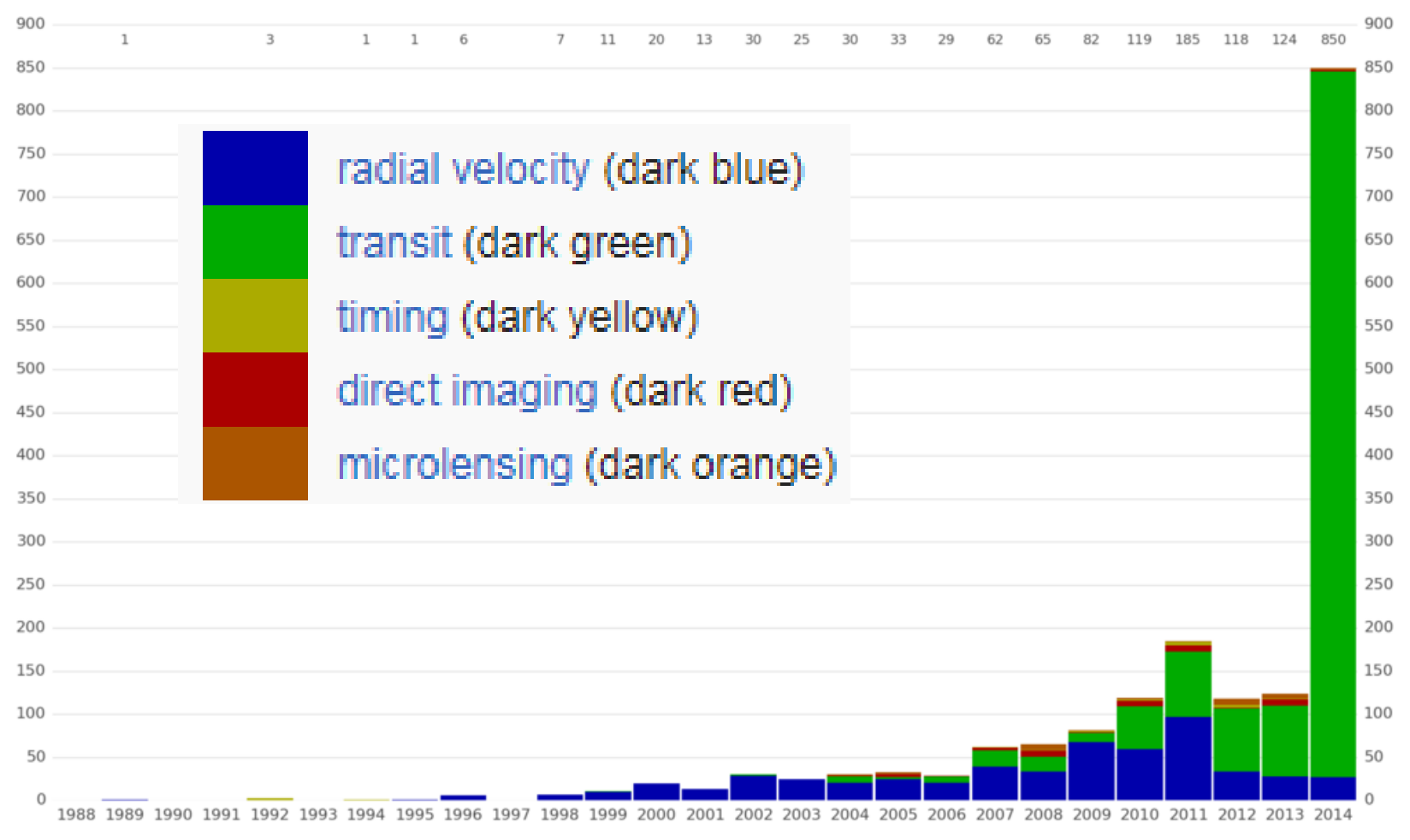
4) Direct imaging

Allesbehalve gemakkelijk omdat de ster vele malen helderder is dan de exoplaneet.

5) Micro lensing

Zwaartekracht werkt als lens en versterkt het licht van een achtergrond ster.

DETECTIE EXO-PLANETEN



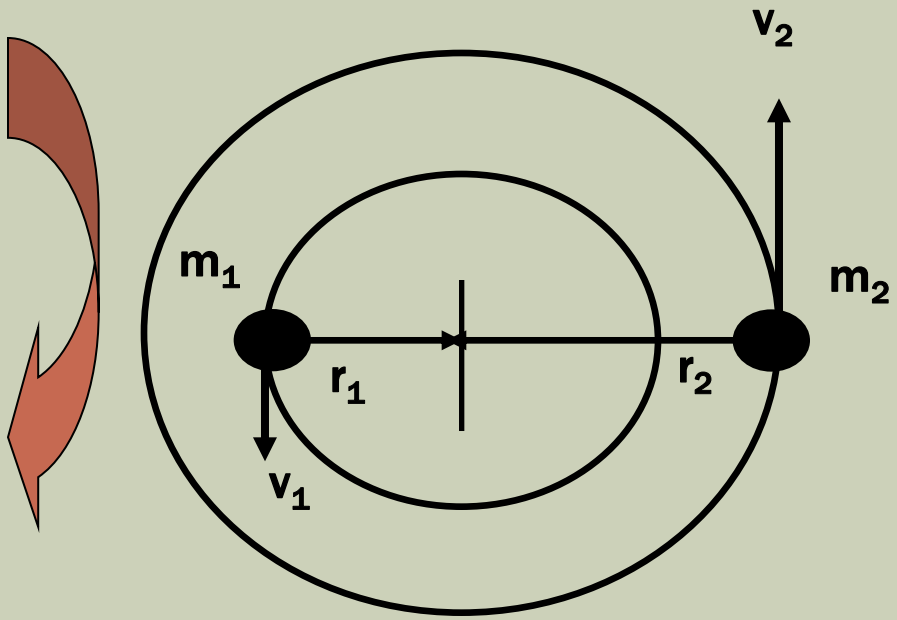
ASTROMETRIE
ZELFDE PRINCIPE ALS DUBBELSTERREN

- Beide sterren bewegen om een gemeenschappelijk zwaartepunt:

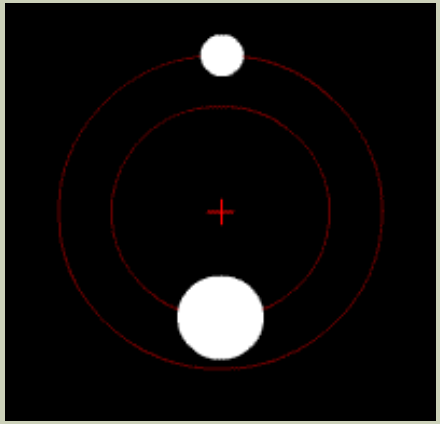
$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

  - Zelfde periode P
  - $v_1/v_2 = r_1/r_2 = m_2/m_1$
  - Leid zelf af (met $R = r_1 + r_2$):

$$4\pi^2 R^3/G = (m_1+m_2)P^2$$

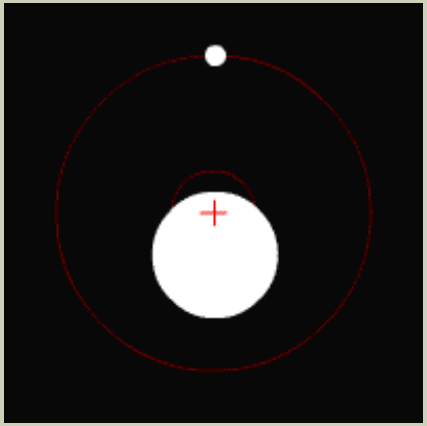


ASTROMETRIE



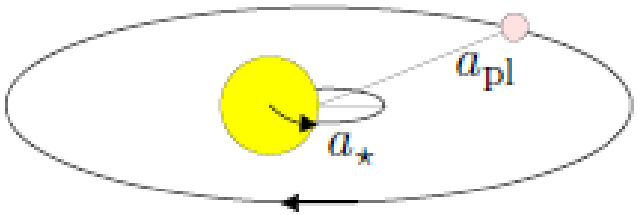
Dubbelsterren

Planeet-ster



Reflex beweging van de ster: halve lange as $a_\star$

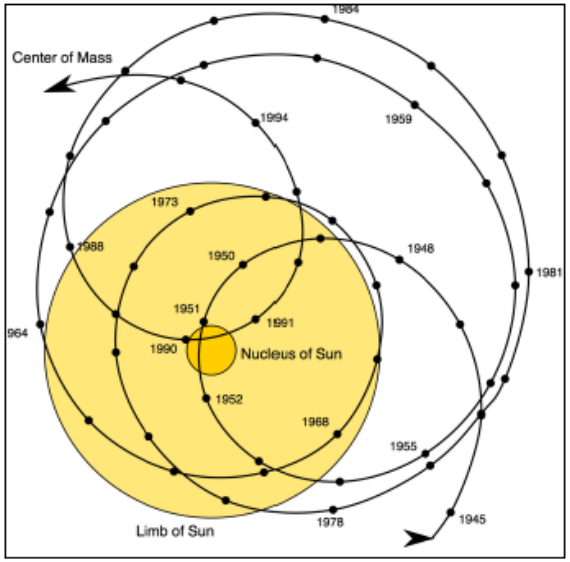
$$a_\star = \frac{m_{\rm pl}}{M_\star}\, a_{\rm pl}$$



- Jupiter op 10 pc, 5 AU = 0.5"; $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 0.5 mas ~ 1.1 $R_\odot$
- Jupiter op 10 pc, 0.05 AU = 5 mas, $M_\odot/M_{\rm Jup}$~1000. → reflex = 5 μas

ASTROMETRIE

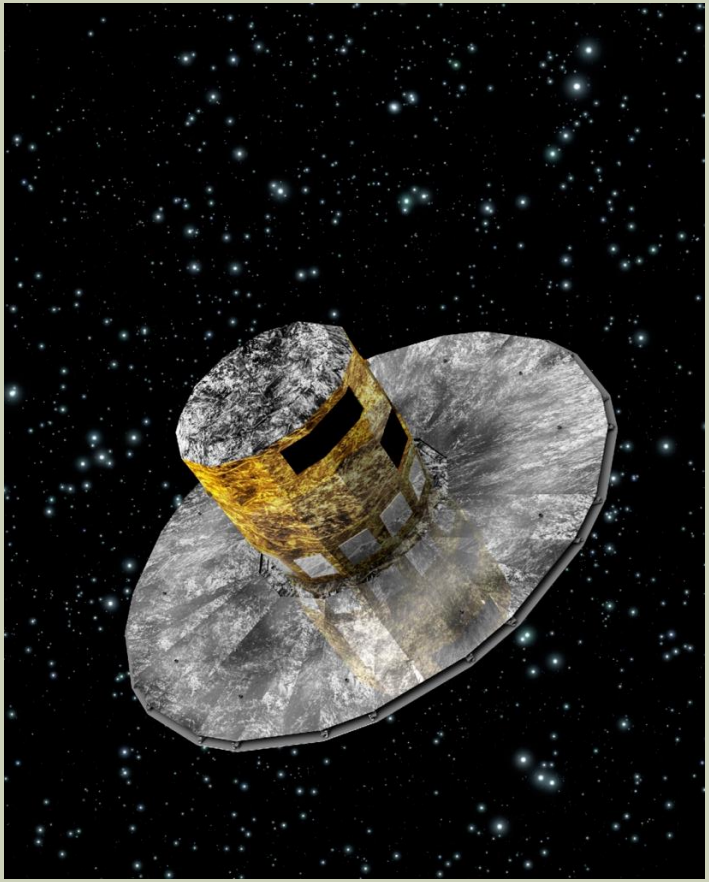
- We zien de baan i.h.a. onder een hoek *i*
- Als $M_\star$ bekend is, volgt $\boldsymbol{a}_{\mathbf{pl}}$ uit de periode *P*: $$P^2 = \frac{4\pi^2 a_{\rm pl}^3}{G(M_\star + m_{\rm pl})}$$
- en met $a_{\rm pl}$ volgt dan $\boldsymbol{m}_{\mathbf{pl}}$ **sin** $\boldsymbol{i}$ uit $a_\star$: $$m_{\rm pl} \sin i = M_\star \frac{a_\star \sin i}{a_{\rm pl}}$$



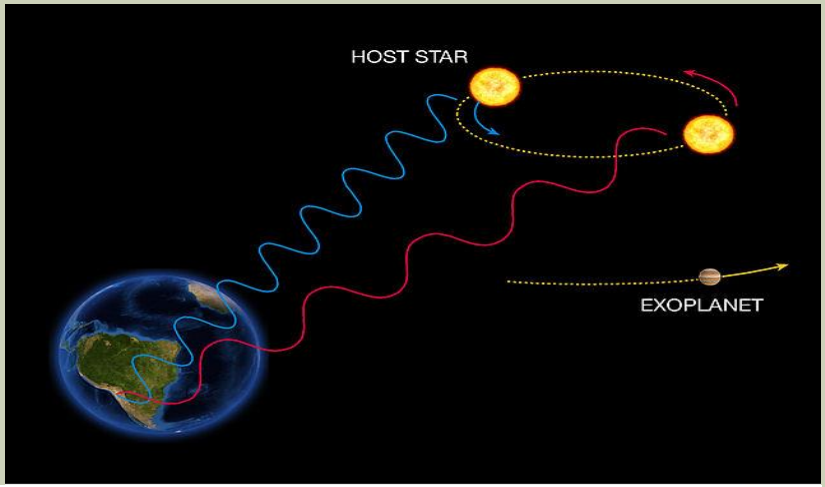
Beweging van het center-of-mass van het zonnestelsel t.o.v. zon. Afgebeeld is de zon en het zwaartepunt ligt soms heel dicht bij de core en ook duidelijk buiten de zon.

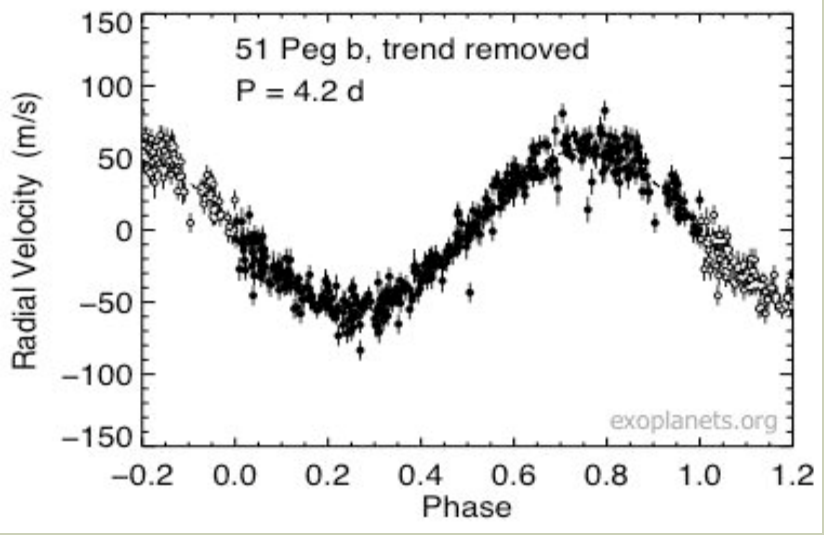
GAIA – THE EXO-PLANET HUNTER

- Vanaf de grond ontbreekt de noodzakelijke astrometrische nauwkeurigheid om objecten van de massa van een planeet te detecteren.
- Wel een aantal bruine dwergen gevonden.
- De ruimtemissie GAIA heeft een astrometrische precisie van μas
- Mjup rond sterren tot 50 pc afstand en periodes van 1.5 – 9 jaar; verwacht 10.000 - 50.000 detecties → running.



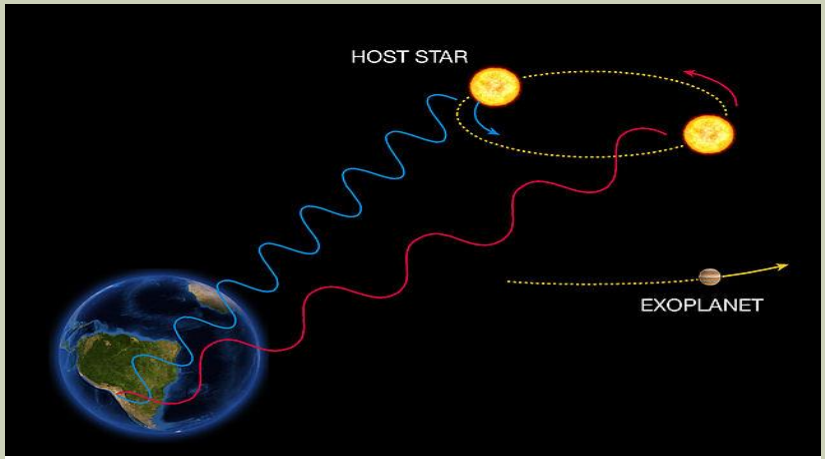
DOPPLER VARIATIE

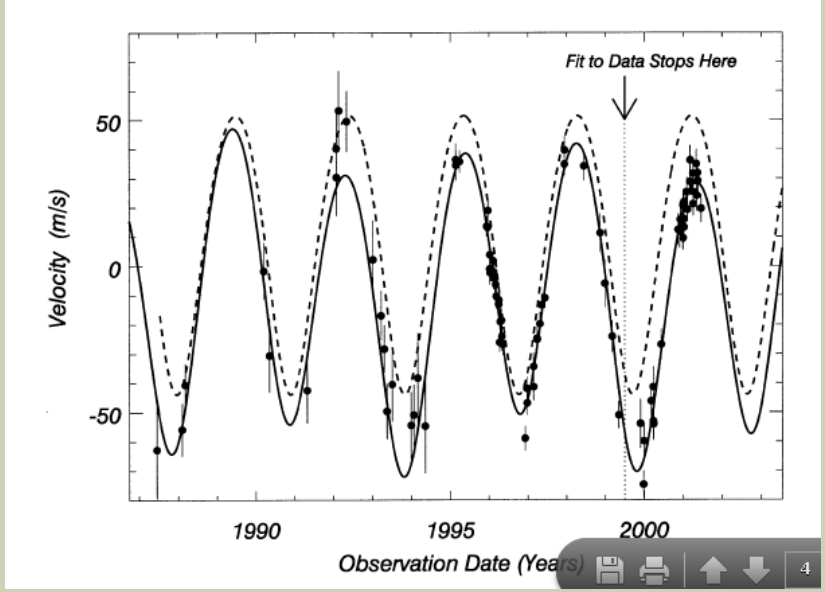




- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.

DOPPLER VARIATIE





- Ook bekend als radiële snelheidsmethode.
- Gebaseerd op Doppler effect; kijk naar blauw/roodver-schuiving van spectrale lijnen agv de netto verandering van de snelheid langs de gezichtslijn.
- Tot 1 m/s verschillen meetbaar.
- Zeer effectieve methode om exo-planeten te ontdekken.
- Niet toepasbaar op jonge sterren of OBA klasses (te weinig spectraallijnen).
- Inclinatie i is vaak niet bekend en maakt dat methode alleen grenswaardes kan bepalen.
- Meer dan 1 planeet mogelijk.

DOPPLER VARIATIE

Kijk alleen naar radiële snelheden, v_r, (dus snelheids-component langs de 'line of sight').

Doppler shift: $\Delta\lambda/\lambda_0 = v_r/c$ ($v_r << c$)

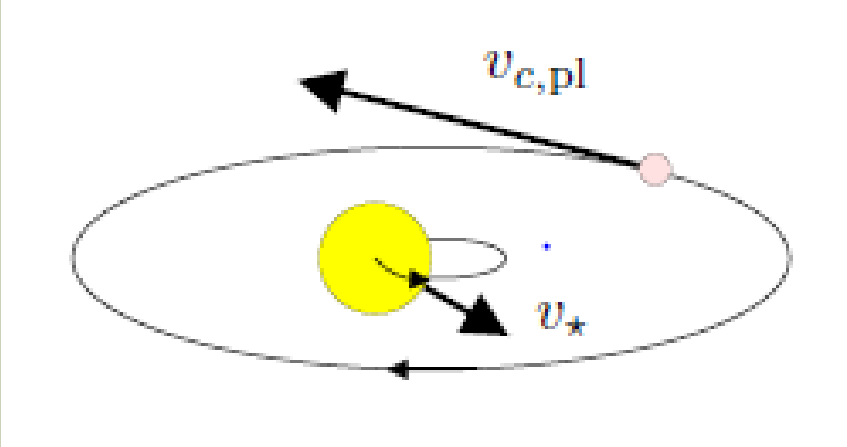
Voor $v_r > 0 \rightarrow \Delta\lambda > 0$: roodverschuiving (van ons vandaan)

Voor $v_r < 0 \rightarrow \Delta\lambda < 0$; blauwverschuiving (naar ons toe)

Via $\lambda.\nu = c$ volgt dan: $\boxed{\Delta\nu/\nu_0 = -\Delta\lambda/\lambda_0 = -v_r/c}$

Methode al bekend voor bepaling massa's van dubbelster systemen (IA)

NU VOOR STER EN EXO-PLANEET



$$\sin(i),$$

$$M_{PL} = \frac{M_{star} V_{star}}{V_{PL}}$$

$$r^3 = \frac{GM_{star}}{4\pi^2} P_{star}^2$$

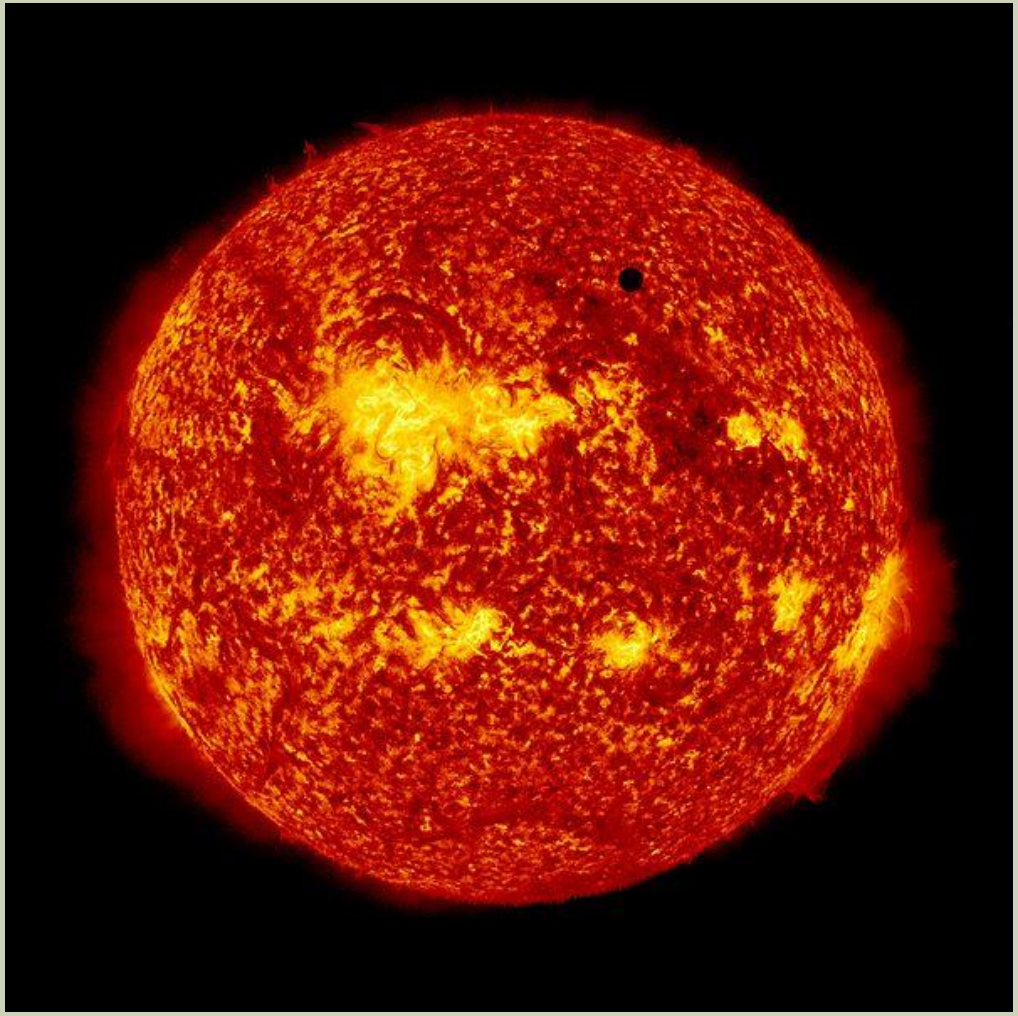
$$V_{PL} = \sqrt{GM_{star}/r}$$

SOME NUMBERS

Radial-velocity comparison tables [edit]

Planet Mass	Distance AU	Radial velocity (v_{radial})	Notice
Jupiter	1	28.4 m/s	
Jupiter	5	12.7 m/s	
Neptune	0.1	4.8 m/s	
Neptune	1	1.5 m/s	
Super-Earth (5 M⊕)	0.1	1.4 m/s	
Alpha Centauri Bb (1.13 ± 0.09 M⊕)	0.04	0.51 m/s	(1[15])
Super-Earth (5 M⊕)	1	0.45 m/s	
Earth	1	0.09 m/s	

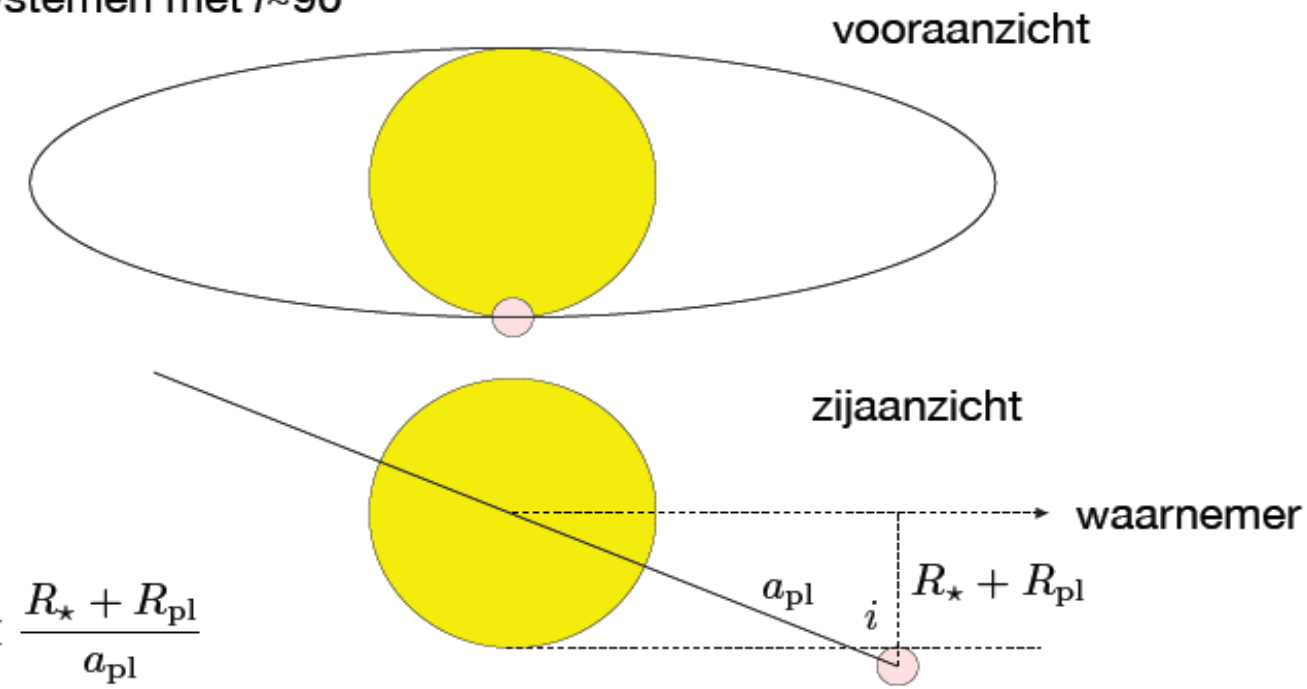
TRANSIT METHODE: VENUS



- Zelfde principe als Venus transit.
- 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012, 2117, 2125, …
- Aarde en Venus staan eens in de ~584 dagen op een lijn (reken dit zelf uit !)
- Niet iedere samenstand resulteert in een bedekking.
- De transit duurt typisch zo'n 4-7 uur.
- Wat leer je daarvan ?

TRANSIT METHODE

- Voor systemen met i~90°

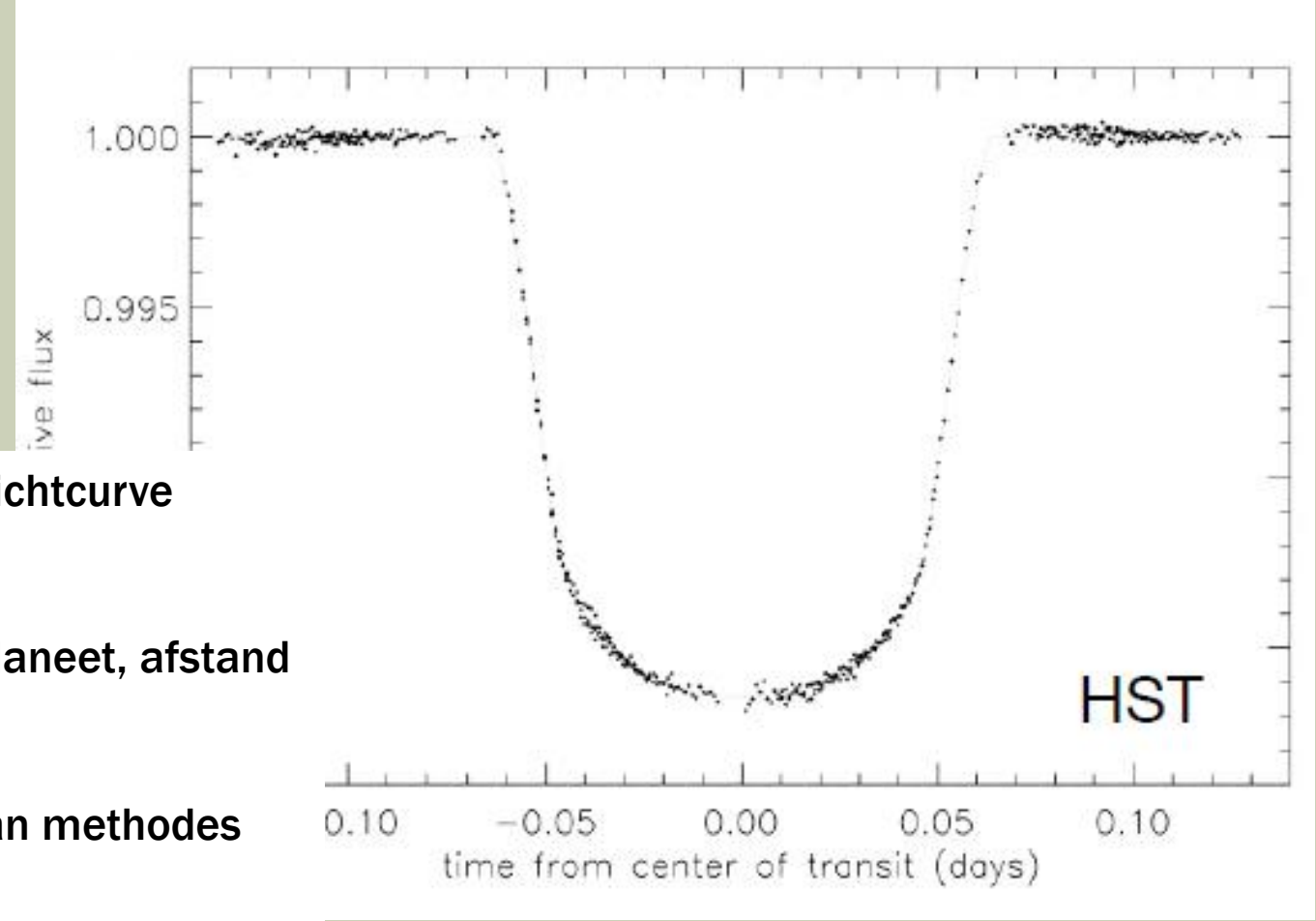


$$\cos i < \frac{R_\star + R_{\rm pl}}{a_{\rm pl}}$$

- Jupiter op 10 pc, 5 AU → $i > 89.9°$
- Jupiter op 10 pc, 0.05 AU → $i > 84.1°$

TRANSIT METHODE

- HD209458



Wat kun je uit zo'n lichtcurve berekenen ?

Omlooptijd, straal planeet, afstand planeet, T, … ?

Soms combinatie van methodes nodig ….

TRANSIT METHODE

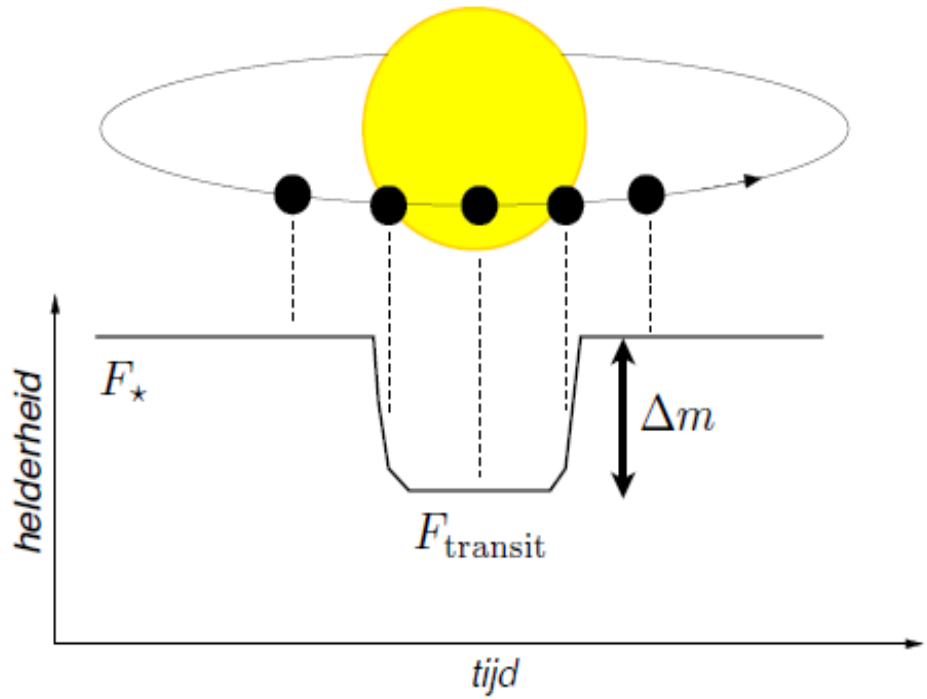
- *Diepte* van de eclips geeft $\boldsymbol{R_{pl}}$

$$F_\star \propto R_\star^2$$

$$F_{\text{transit}} \propto R_\star^2 - R_{\text{pl}}^2$$

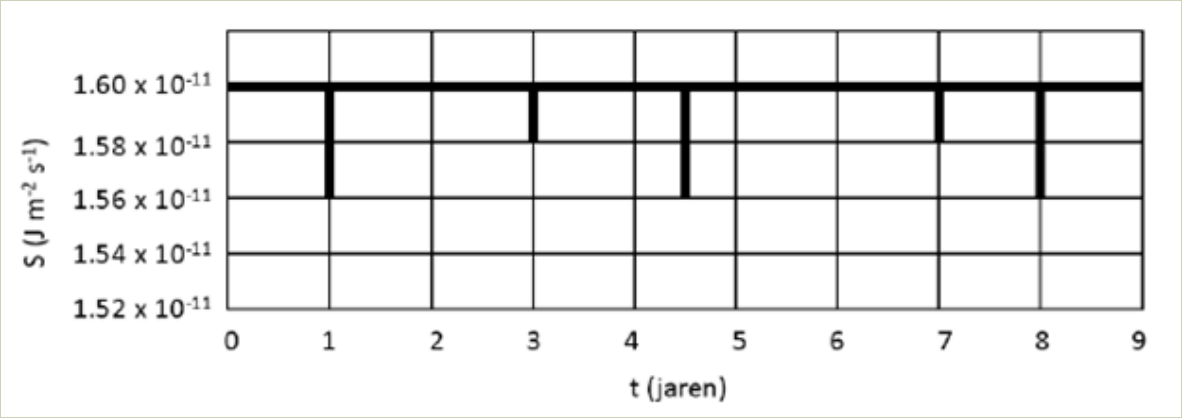
$$\downarrow$$

$$\Delta m = -2.5\,{}^{10}\log\left(\frac{R_\star^2}{R_\star^2 - R_{\text{pl}}^2}\right)$$



- Jupiter, zon→ $F_{\text{transit}} \sim 0.99 \times F_\star$; Δm = 12 millimag

OUDE TENTAMENOPGAVE (ZIE HC5)



Bereken de straal van beide exo-planeten wanneer de ster een straal heeft, gelijk aan die van de zon.

Tijdens de bedekking geldt:

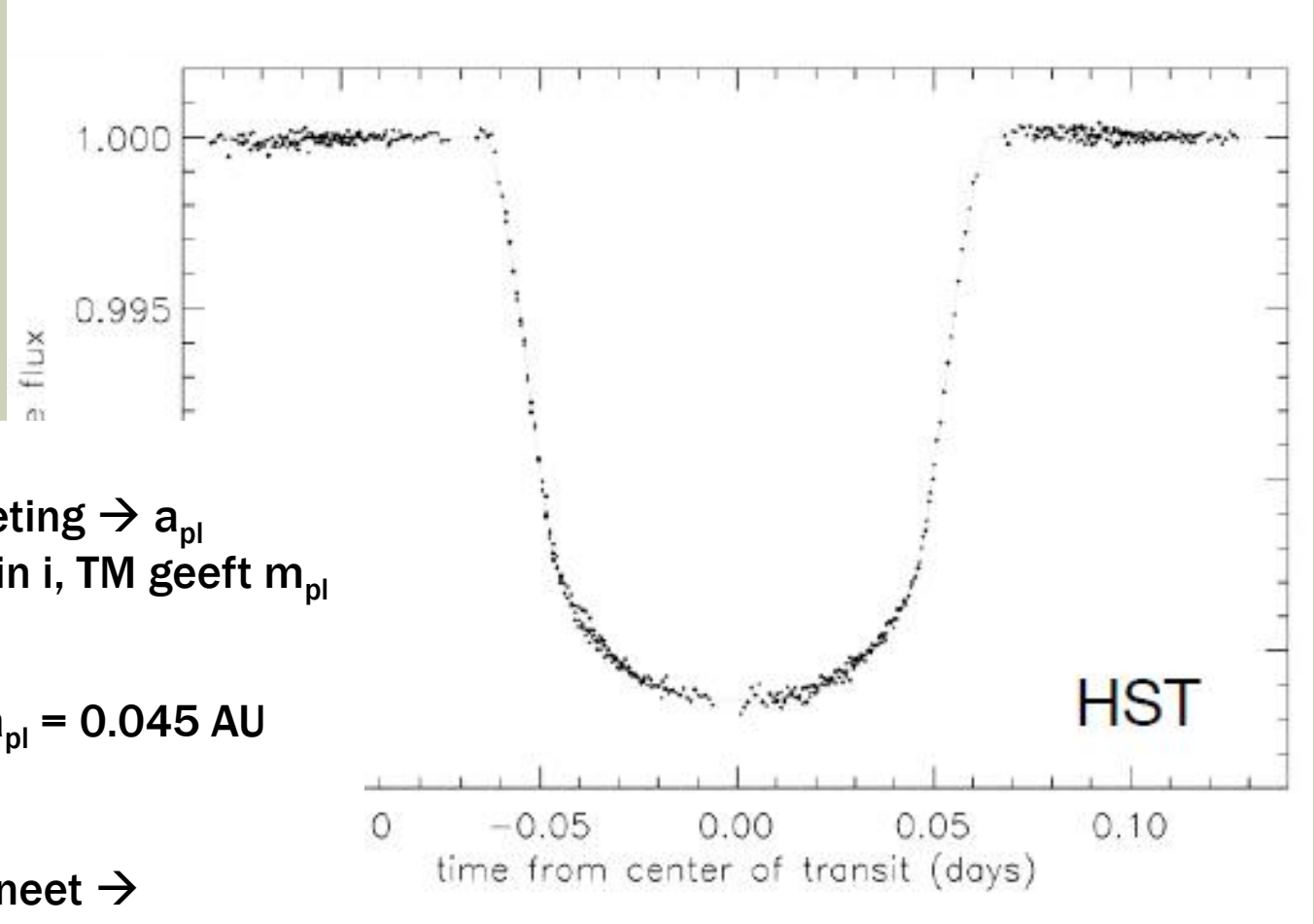
$(R^{*2} - R_{exo}^2) / R^{*2}$ $= 1.58 / 1.60 = 0.9875$ voor planeet 1,
$= 1.56 / 1.60 = 0.975$ voor planeet 2.

Dus voor planeet 1
$R_{exo}^2 = (R^{*2} - 0.9875\ R^{*2}) = 0.0125\ R^{*2} = 0.0125\ Rzon^2 \rightarrow R_{exo,1} = 7.8.10^7$ m

en voor planeet 2
$R_{exo}^2 = (R^{*2} - 0.975\ R^{*2}) = 0.025\ R^{*2} = 0.025\ Rzon^2 \rightarrow R_{exo,2} = 1.1.10^8$ m

TRANSIT METHODE

- HD209458

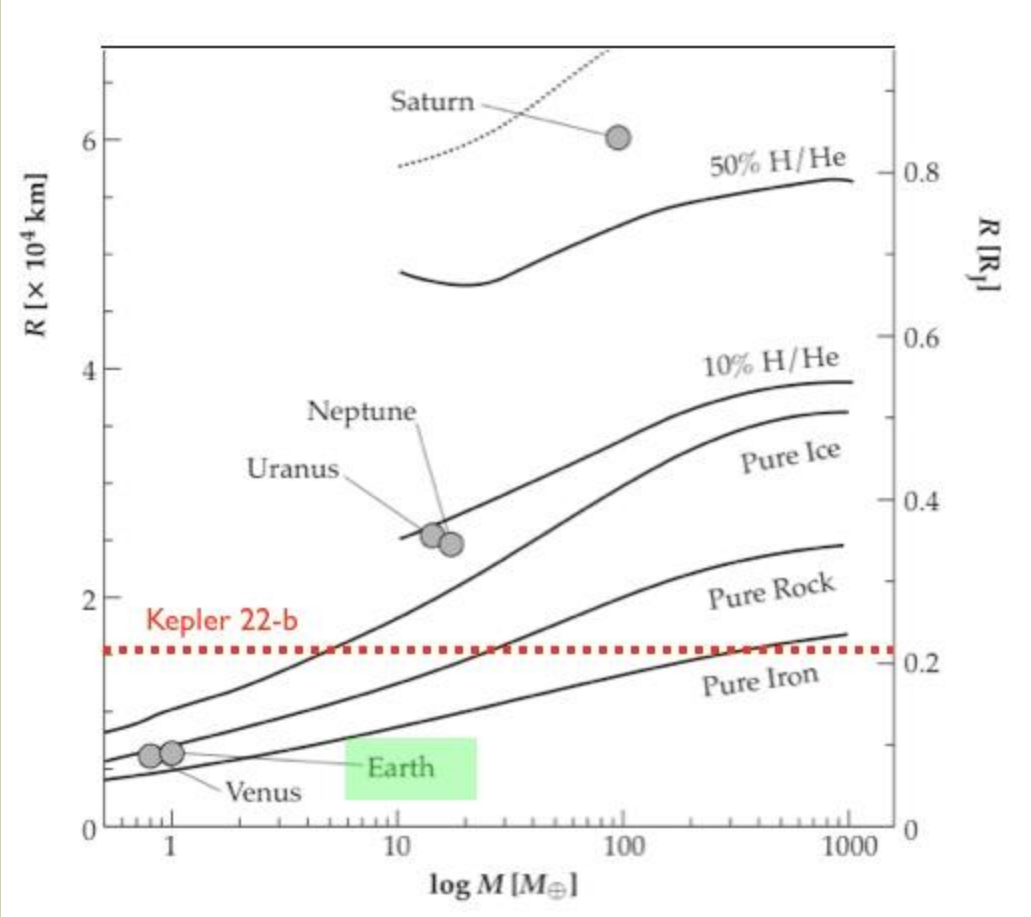


Radiele snelheidsmeting → a_{pl}
RS geeft alleen $m_{pl}\sin i$, TM geeft m_{pl}

→ $M_{pl} = 0.69\ M_{jup}$
→ P = 3.52 dagen, $a_{pl} = 0.045$ AU
→ $R = 1.4\ R_{jup}$

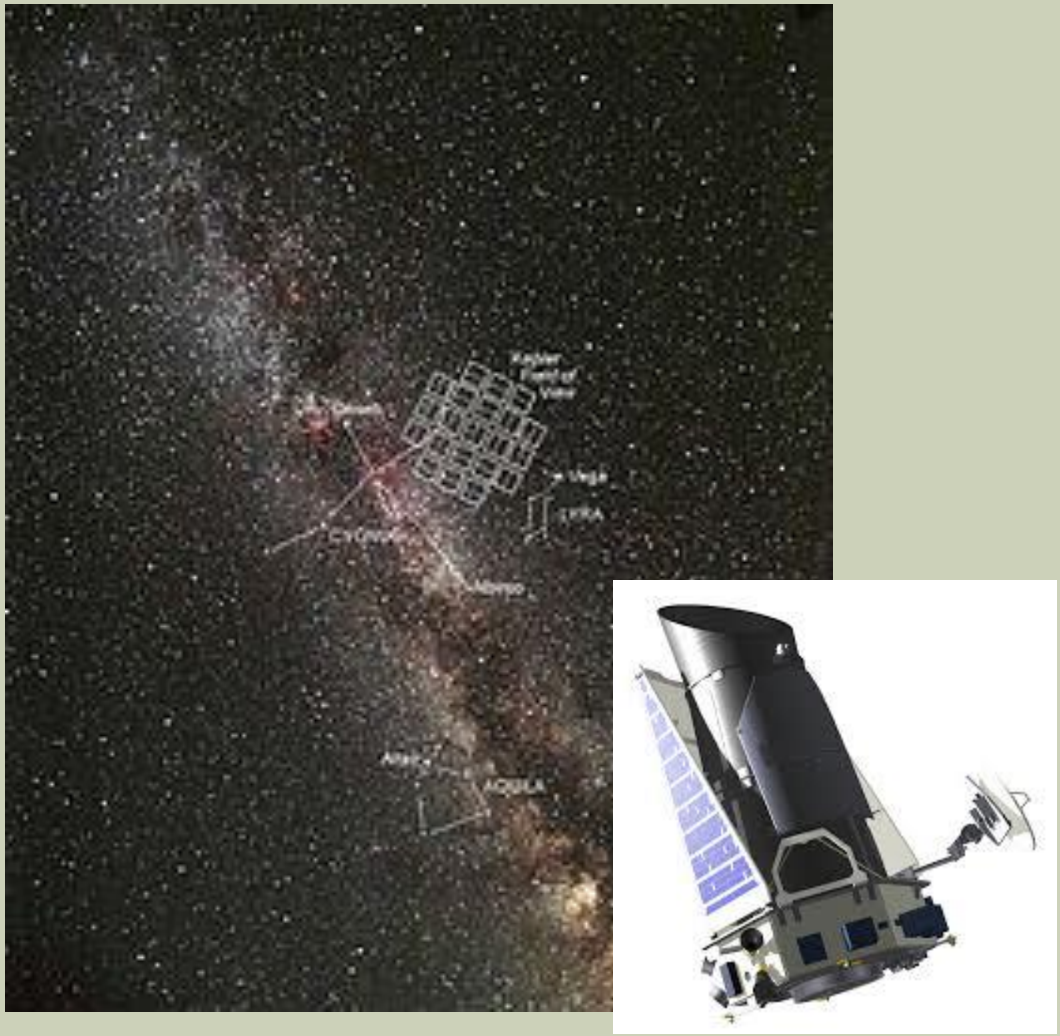
→ Dichtheid van planeet → samenstelling → vooral waterstof

TRANSIT METHODE



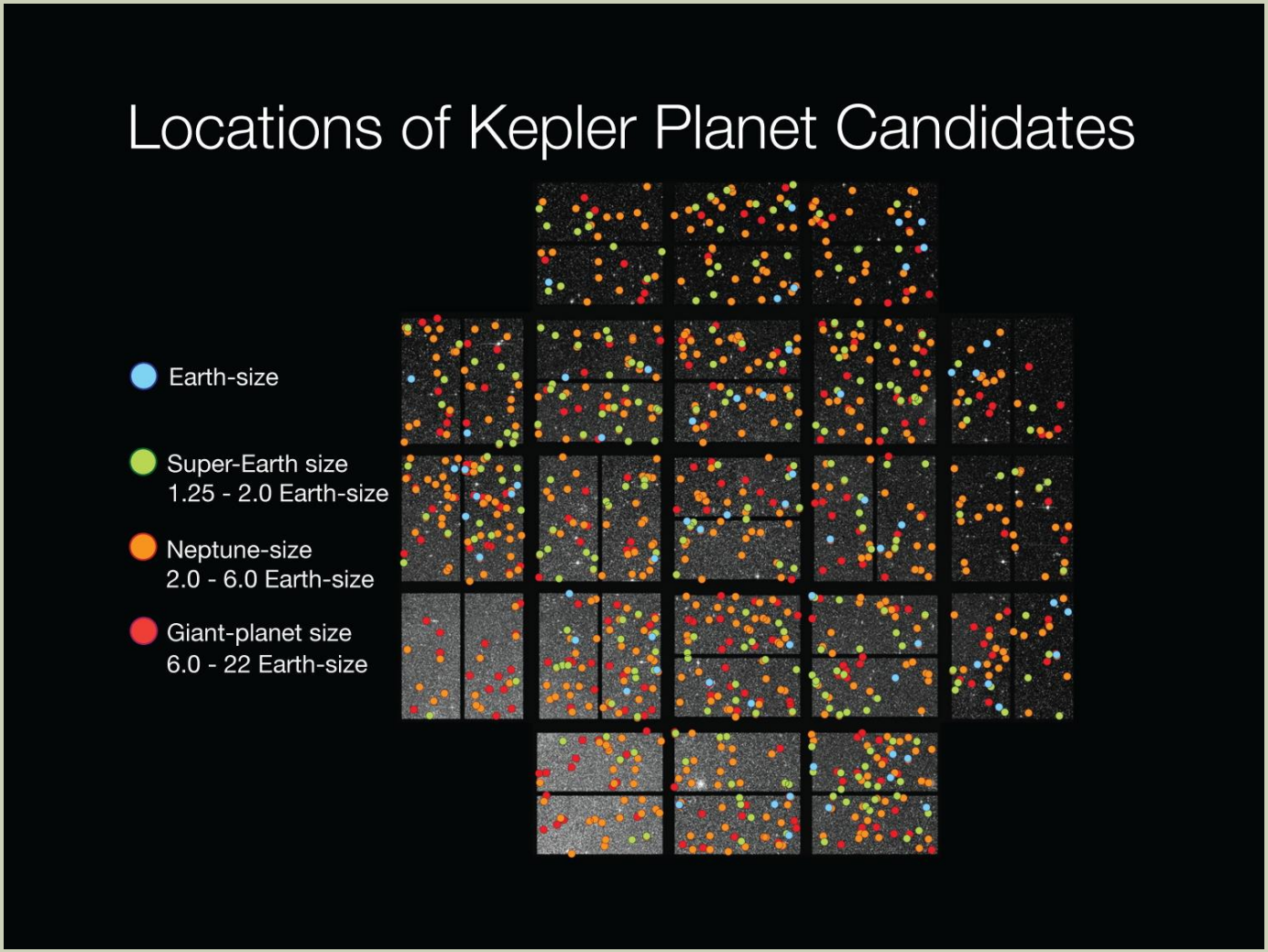
Methodes staan dus toe om inzicht te krijgen in de samenstelling van exo-planeten.

TRANSIT METHODE: KEPLER MISSIE



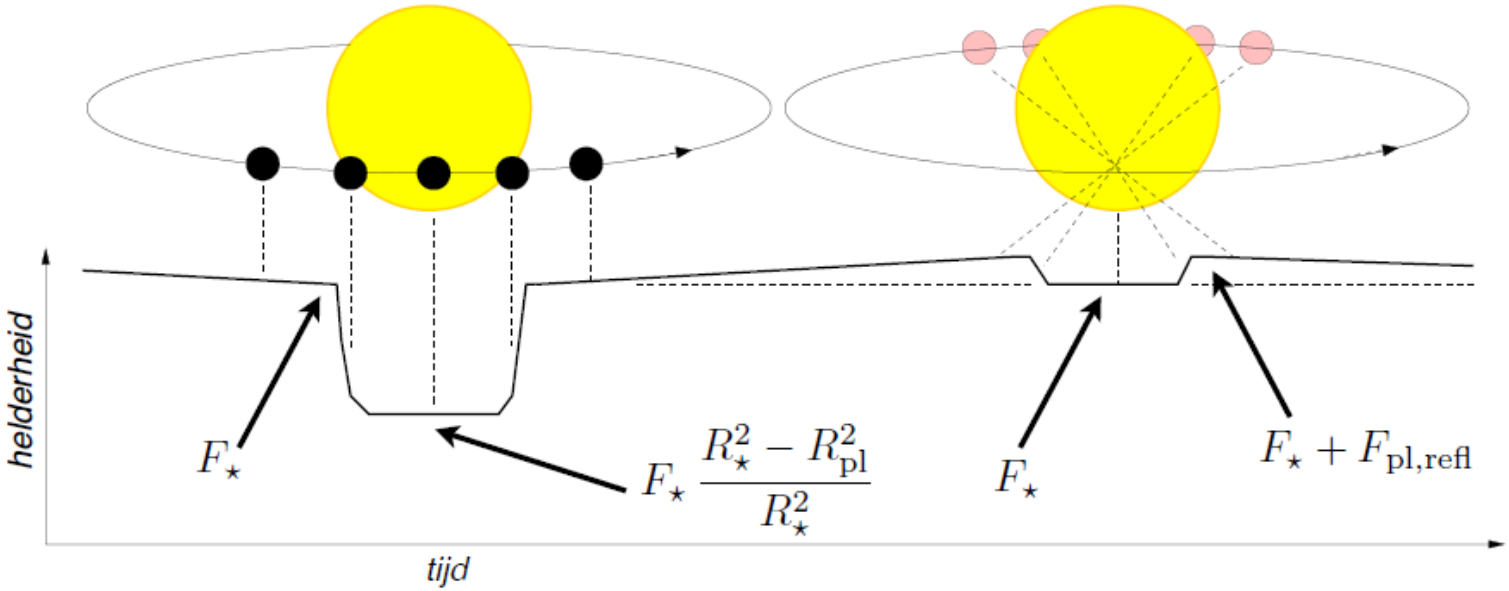
- 0.95m Schmidt telescoop.
- Van 2009-2013 naar sterrenbeeld Zwaan gekeken.
- 190000 sterren in de gaten gehouden.
- Groot beeldoppervlak (veel sterren gelijk-tijdig onderzoeken).
- Groot aantal kandidaat planeten (4000).
- Inmiddels meerdere honderden bevestigd.

TRANSIT METHODE: KEPLER MISSIE



TRANSIT METHODE: REFINED - SECONDAIRE ECLIPS -

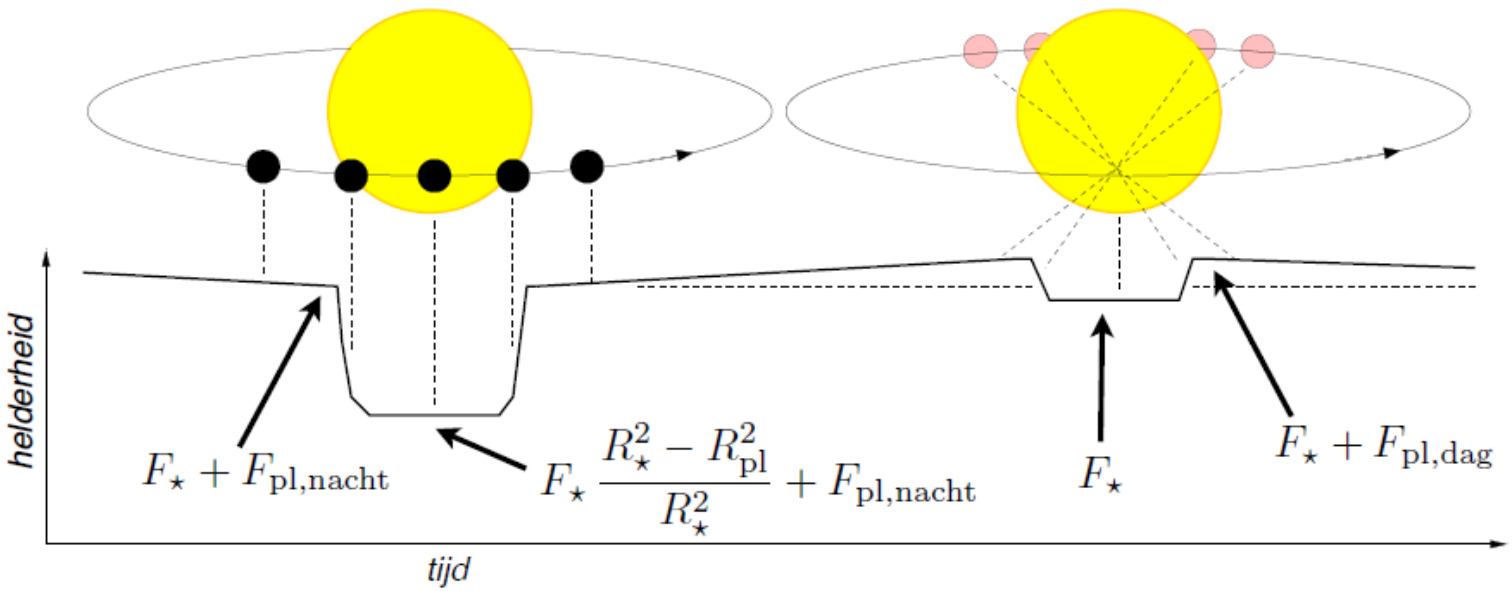
- Ook de planeet wordt verduisterd door de ster
  - In gereflecteerd licht: albedo ***A***
  - Domineert in VIS (visueel)



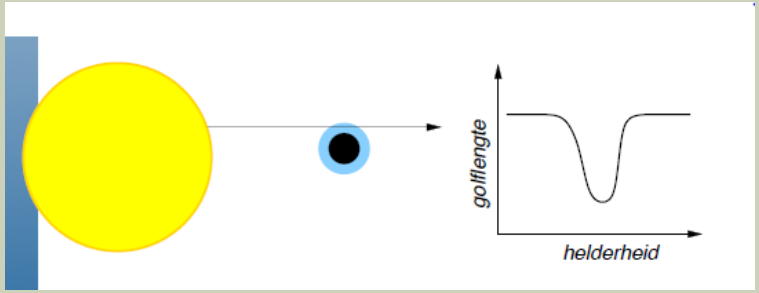
TRANSIT METHODE: REFINED - SECONDAIRE ECLIPS -

- Ook de planeet wordt verduisterd door de ster
  - In uitgezonden licht: geeft $\boldsymbol{T}_{\mathbf{pl}}$
  - Verschil in temperatuur planeet dag- vs nacht-zijde
  - Belangrijk in thermisch infrarood (IR)

$$F_{\mathrm{uit}} = 4\pi R_{\mathrm{pl}}^2 \, \sigma T_{\mathrm{eff}}^4$$



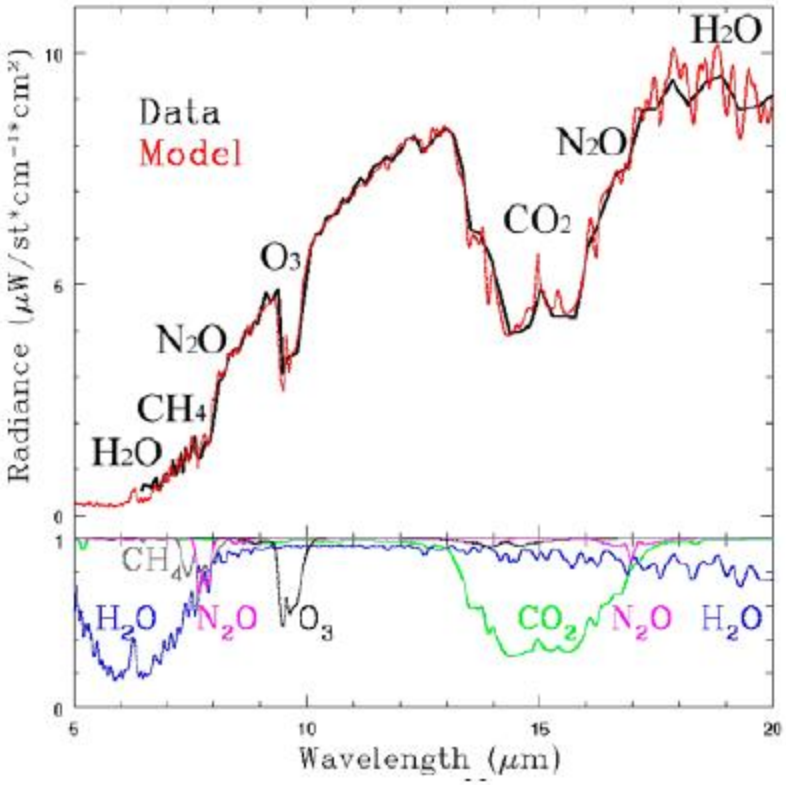
TRANSIT METHODE: REFINED - ATMOSFEREN -



- Onderzoek het licht dat wordt geabsorbeerd door de atmosfeer tijdens de transit, of licht dat wordt uitgestraald aan de nachtkant (tijdens transit) of algemeen tijdens de omdraaiing.
- Erg moeilijk, omdat de spectrale lijnen van de ster vele malen sterker zijn.
- Daarom moeten spectra voor en na transit met elkaar vergeleken worden.
- Planeet lijkt iets groter op golflengtes die absorberen. Waarom ?
- Metingen hebben lage resolutie; tot nu toe alleen H2O en CO2 eenduidig aangetoond.
- Doel: biomarkers.

ATMOSFEER AARDACHTIGE PLANEET

- Signaal van diverse moleculen in spectrum van atmosfeer
  - CO_2, O_3, CH_4, H_2O: indicatie van aanwezigheid fotosynthese



DIRECT IMAGING
HOE HELDER IS EEN PLANEET ?

- Planeet weerkaatst sterlicht en zendt zelf thermische straling uit

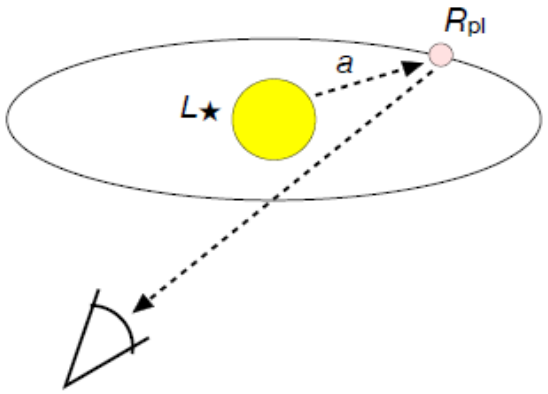
- Hoeveel licht weerkaatst een planeet?
  - Verwaarloos schijngestalten van de planeet
  - De hoeveelheid licht opgevangen door een planeet met straal R_{pl} op afstand a van een ster met lichtkracht $L_\star$ is

$$F_\star = \frac{L_\star}{4\pi a^2} \cdot \pi R_{\rm pl}^2$$

  - Hiervan wordt een fractie A weerkaatst

$$F_{\rm pl} = A \cdot \frac{L_\star}{4\pi a^2} \cdot \pi R_{\rm pl}^2$$

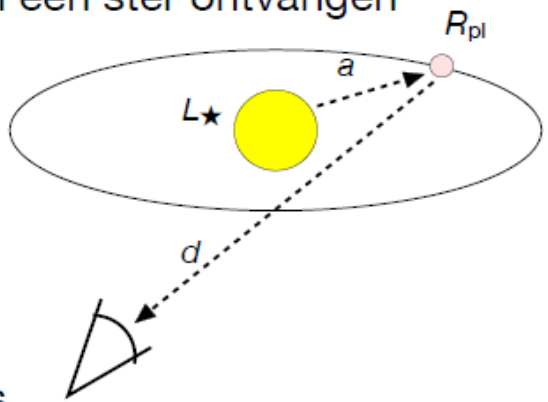
    - A = albedo



DIRECT IMAGING
HOE HELDER IS EEN PLANEET ?

- Door een waarnemer op afstand *d* wordt van een ster ontvangen

$$F'_\star = \frac{L_\star}{4\pi d^2}$$



- ...en van een planeet

$$F'_{\rm pl} = \frac{L_{\rm pl}}{4\pi d^2} = A\frac{L_\star}{4\pi a^2}\pi R_{\rm pl}^2\,\frac{1}{d^2}$$

- Het helderheidsverschil in magnituden is dus

$$\Delta m = -2.5\,{}^{10}\log\left(\frac{F'_{\rm pl}}{F'_\star}\right) = -2.5\,{}^{10}\log\left(\frac{AR_{\rm pl}^2}{4a^2}\right)$$

- **on**afhankelijk van afstand *d* of golflengte λ.

- Jupiter op *a*=5 AU met A=0.52: Δ*m* = 22.3
- Jupiter op *a*=0.05 AU met A=0.52: Δ*m* = 12.3

DIRECT IMAGING
HOE HELDER IS EEN PLANEET ?

- Een planeet zendt zelf ook thermische straling uit, bij een effectieve temperatuur T_{eff}.
  - Voor een ster als de zon is $T_{\mathrm{eff}}=T_{\star}=5778$ K
  - Wat is de $T_{\mathrm{eff,pl}}$ voor een planeet?
    - Beschouw alleen verwarming door sterlicht
    - Er geldt: ontvangen straling = uitgezonden straling

Fractie A wordt weerkaatst en draagt niet bij!

    - Straling ontvangen door de ster $F_{\mathrm{in}} = \frac{L_{\star}}{4\pi a^2}\,\pi R_{\mathrm{pl}}^2\,(1-A)$
    - Uitgezonden straling is gegeven door $F_{\mathrm{uit}} = 4\pi R_{\mathrm{pl}}^2\,\sigma T_{\mathrm{eff}}^4$
- De evenwichtstemperatuur $T_{\mathrm{eff,pl}}$ is dus $T_{\mathrm{e}} = T_{\mathrm{eff}} = \left(\frac{L_{\star}}{a^2}\,\frac{1-A}{16\pi\sigma}\right)^{1/4}$

DIRECT IMAGING
HOE HELDER IS EEN PLANEET ?

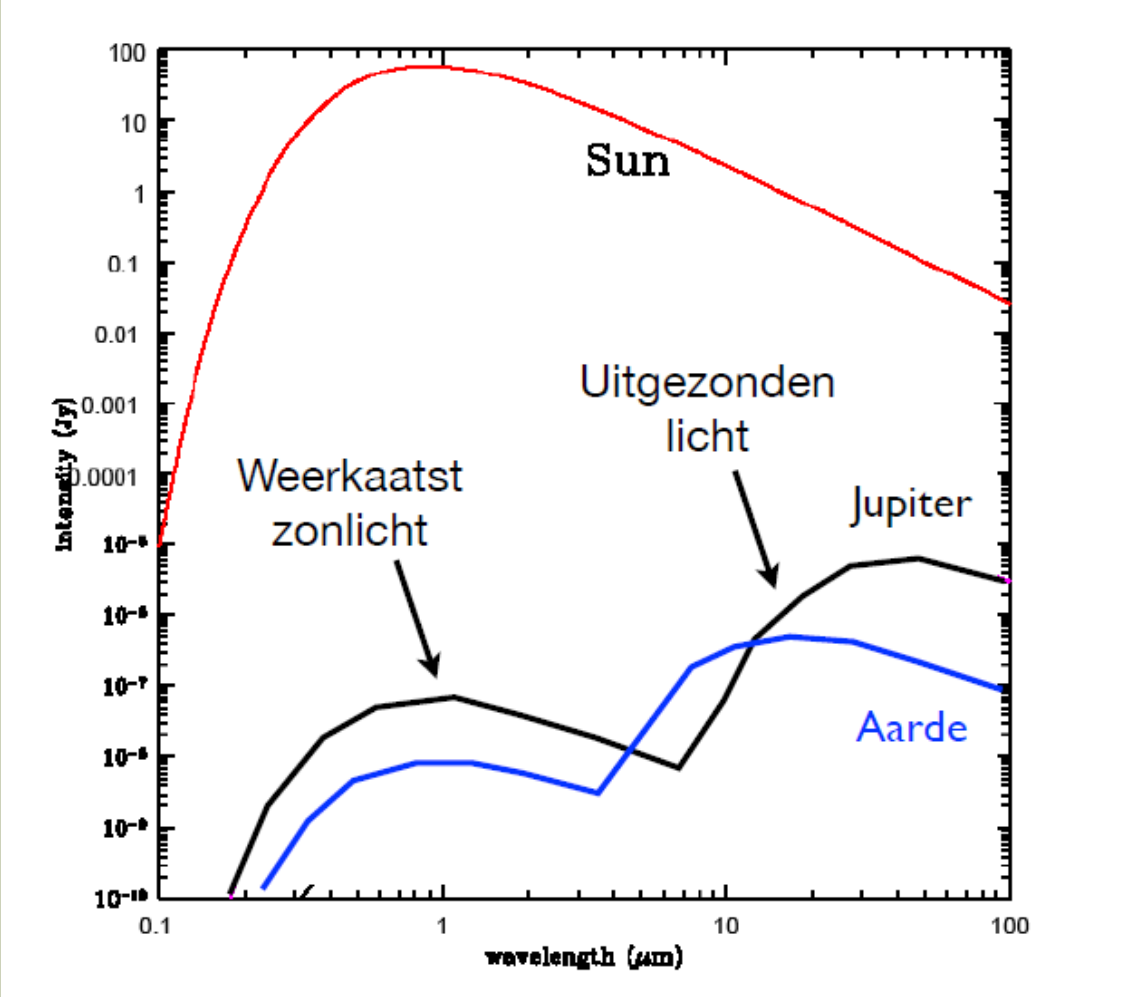
- Jupiter op a=5 AU met A=0.52: T_{eff} = 104 K
- Jupiter op a=0.05 AU met A=0.52: T_{eff} = 1043 K
- Aarde op a=1 AU met A=0.37: T_{eff} = 250 K

- Verhouding van de waargenomen helderheden van ster en planeet:
  - verhouding van de Planckfuncties voor de respectievelijke T_{eff} en verhouding van het stralend oppervlak:

$$\left(\frac{F'_\star}{F'_{\mathrm{pl}}}\right) = \frac{B_\nu(T_\star)}{B_\nu(T_{\mathrm{e}})}\,\frac{\pi R_\star^2}{\pi R_{\mathrm{pl}}^2} = \frac{e^{h\nu/kT_{\mathrm{e}}}-1}{e^{h\nu/kT_\star}-1}\,\frac{\pi R_\star^2}{\pi R_{\mathrm{pl}}^2}$$

  - De helderheidsverhouding hangt af van de golflengte λ!
    - of in bovenstaande uitdrukking, de frequentie ν

DIRECT IMAGING
HOE HELDER IS EEN PLANEET ?



DIRECT IMAGING
VERGELIJK REFLECTIE VS THERMISCHE EMISSIE

- In uitgezonden licht

Planeet	Golflengte	Δm
Jupiter, a=5 AU	VIS, 500 nm	300
	NIR, 2 μm	79.1
	MIR, 10 μm	21.3
	FIR, 30 μm	12.6
Jupiter, a=0.05 AU	VIS, 500 nm	29.5
	NIR, 2 μm	11.4
	MIR, 10 μm	7.5
	FIR, 30 μm	7.0

Vgl: in weerkaatst licht is Δm 22.3 (5 AU) en 12.3 (0.05 AU).

DIRECT IMAGING: SAMENVATTEND

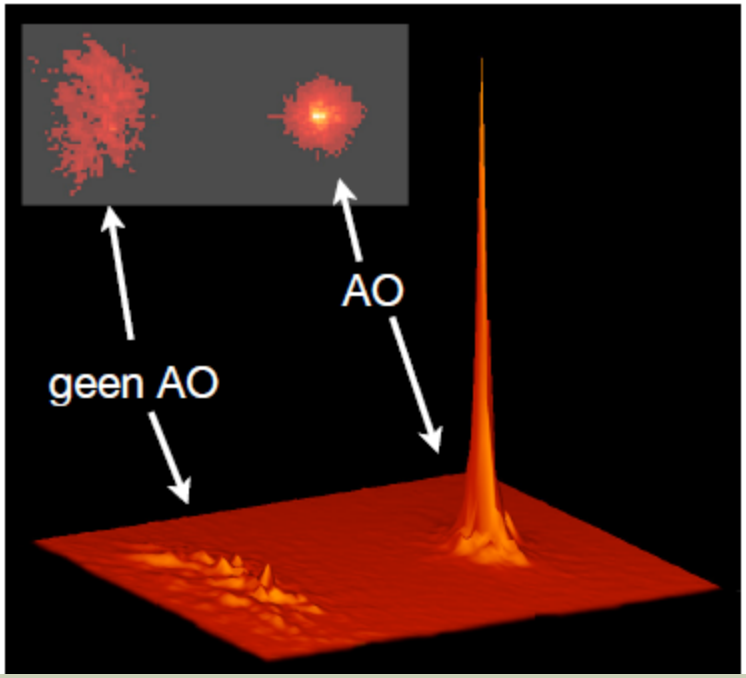
- Conclusie:
  - Jupiter-achtige planeet op a=0.05–5 AU is minder helder dan ster met
    - 12–22 magnitudes in weerkaatst licht
    - 7–22 magnitudes in uitgezonden infrarood licht
- Tot $\Delta m \sim 15$ is geen probleem als ster $m \sim 5$ heeft

- Maar:
  - Hoekafstand tussen ster en planeet is erg klein
    - Voorbeeld: op 10 pc: 5 AU = 0.5”; 0.05 AU = 5 mas
    - Natuurlijke seeing is 0.3”–1” op goede locaties

- Licht van planeet ‘verdrinkt’ in verstrooid licht van de ster!

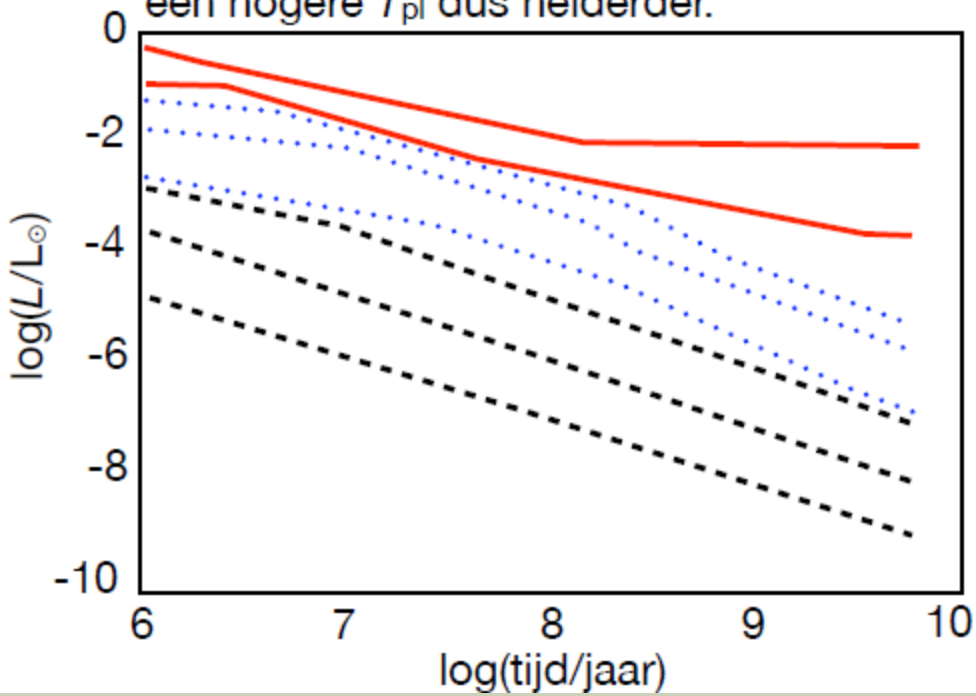
INSTRUMENTATIE; TRICKS

- Er bestaan technieken om dit deels te corrigeren
- Met adaptive optics wordt de atmosferische seeing gecorrigeerd
  - Sterlicht (en planeetlicht) wordt beter geconcentreerd
  - Een groter helderheidsverschil is nu overbrugbaar
- Met *speckle imaging* neem je in snelle opeenvolging een opname zodat de atmosferische verstoringen 'stil staan'
  - M.b.v. beelreconstructie kan een beter beeld worden gemaakt
- Met een coronograaf of een zg. occulting mask wordt het sterlicht geblokkeerd



OF GOEDE SAMPLE KEUZE

- Je kunt het probleem ook eenvoudiger maken door
  - rond M-sterren te kijken: lagere $T_\star$ en dus een minder heldere ster
  - naar jonge systemen te kijken: planeet is nog bezig oorspronkelijke gravitationele energie 'weg te stralen' (is nog niet afgekoeld), en is met een hogere T_{pl} dus helderder.



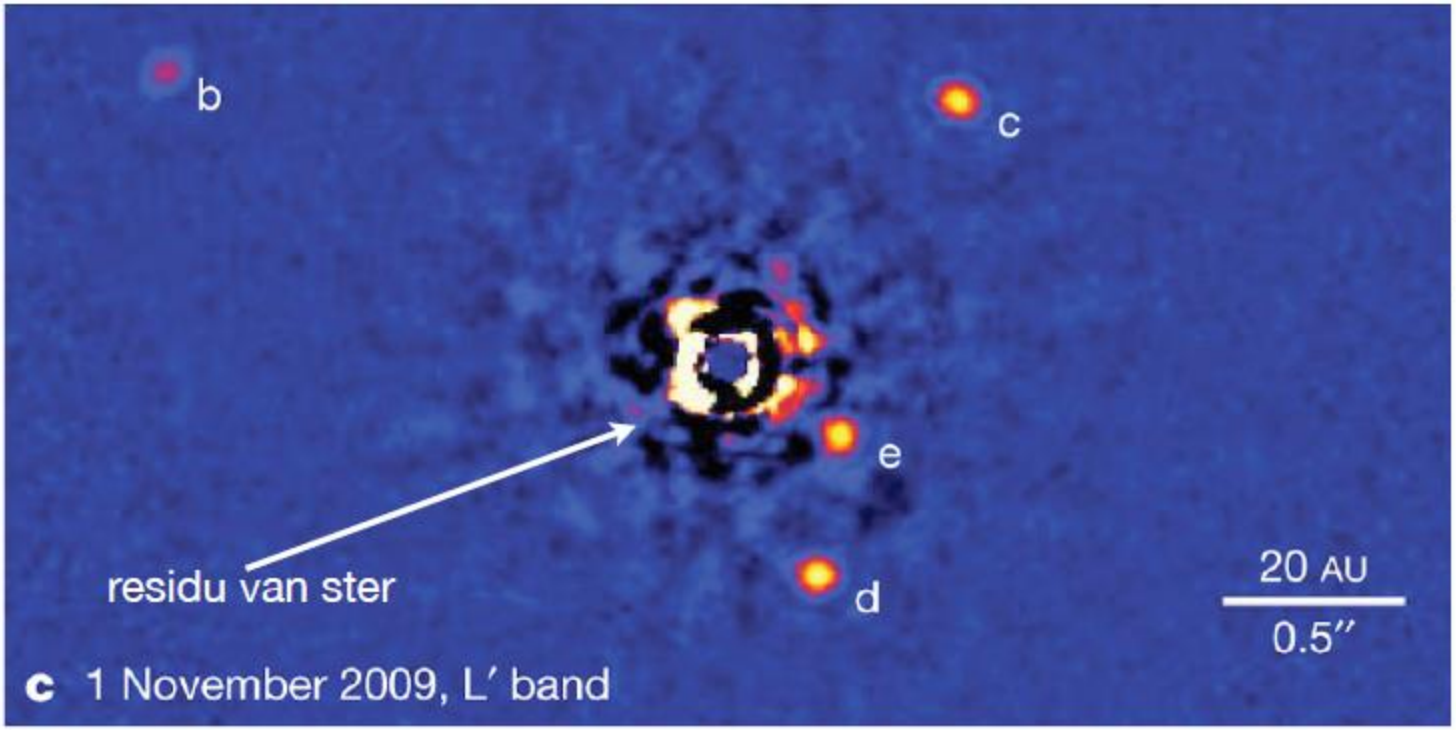
ster: M>0.08 $M_\odot$

bruine dwerg: M<0.08 $M_\odot$
Deuterium fusie

planeet: M<15 M_{Jup}

RESULTAAT: HR8799

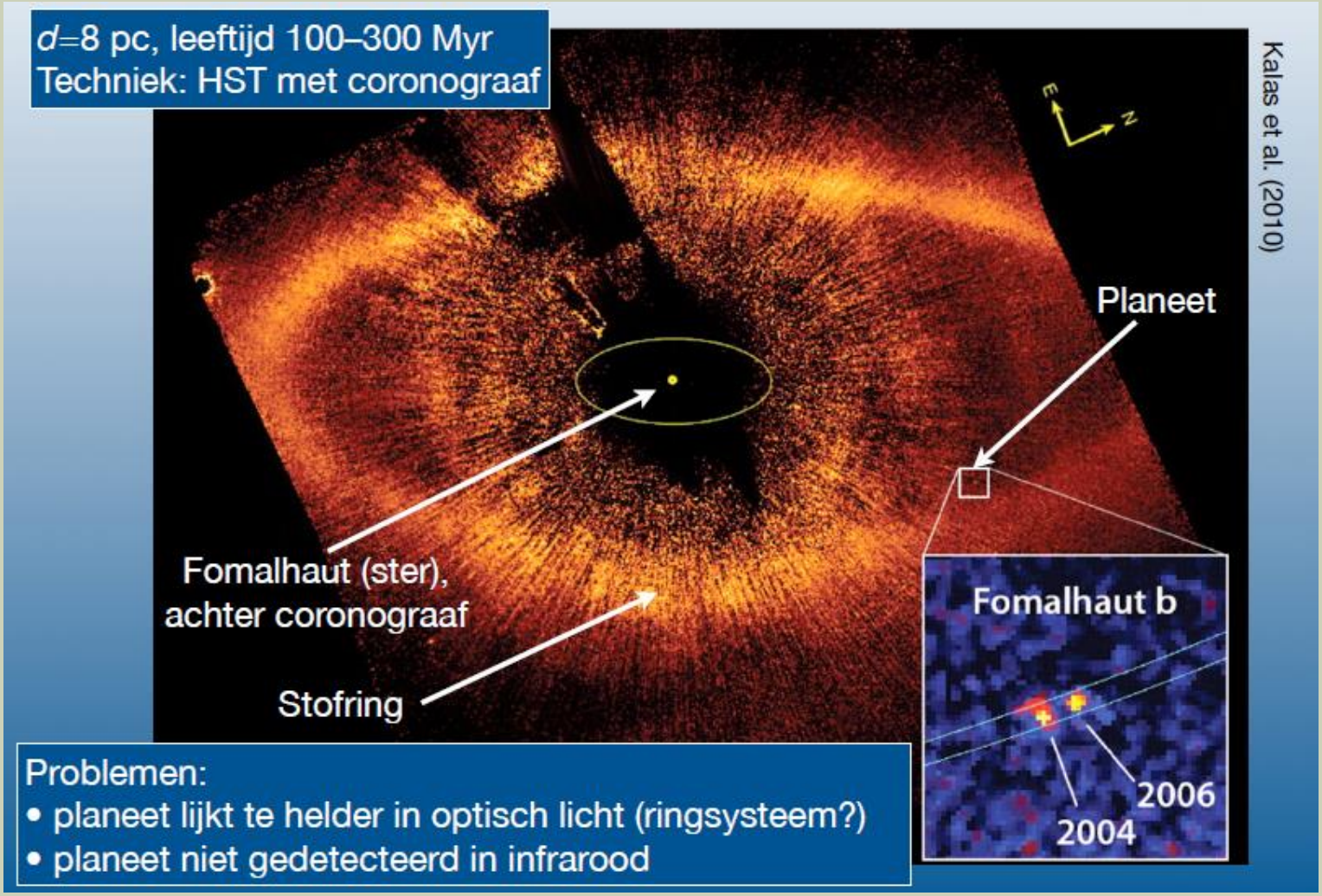
- HR8799: *d*=39 pc, ~30 Myr oud



Marois et al. (2010)

Gebruikte techniek: *angular differential imaging*. Verschil van opnames waarbij de camera geroteerd wordt. Alleen niet-symmetrische deel blijft over : planeten.

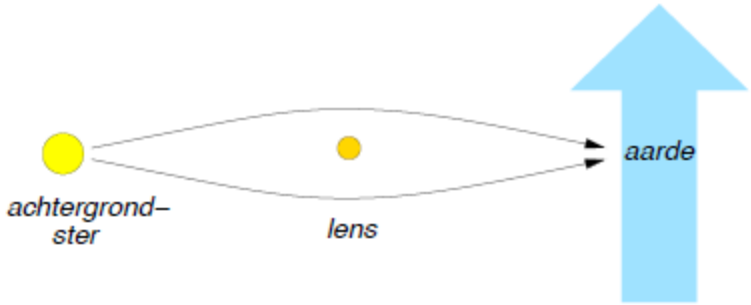
RESULTATEN: FOMALHAUT B

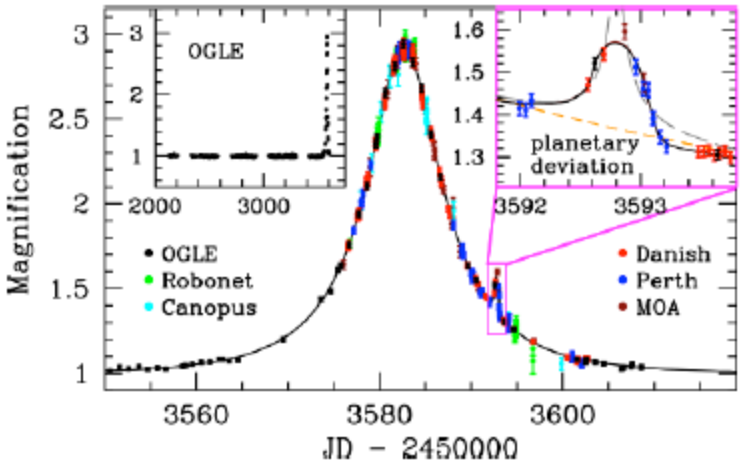


Kalas et al. (2010)

ZWAARTEKRACHTSLENS

- Zwaartekracht buigt licht, en kan werken als lens





- Event geeft informatie over m_{pl}, a_{proj}
  - Maar niet over P, i, of e
  - I.h.a. geen tweede meting mogelijk! Uniek event!
  - Kan welk statistiek doen als steekproef groot genoeg is.
    - 17^{+6}_{-9}% van sterren heeft planeet met massa 0.3–10 M_{Jup}
    - 52^{+22}_{-29}% een planeet met m_{pl}=10–30 M_{aarde} ('cool Neptune')
    - 62^{+35}_{-37}% een planeet met m_{pl}=5-10 M_{aarde} ('super aarde')

EXOPLANETEN / STATISTIEK

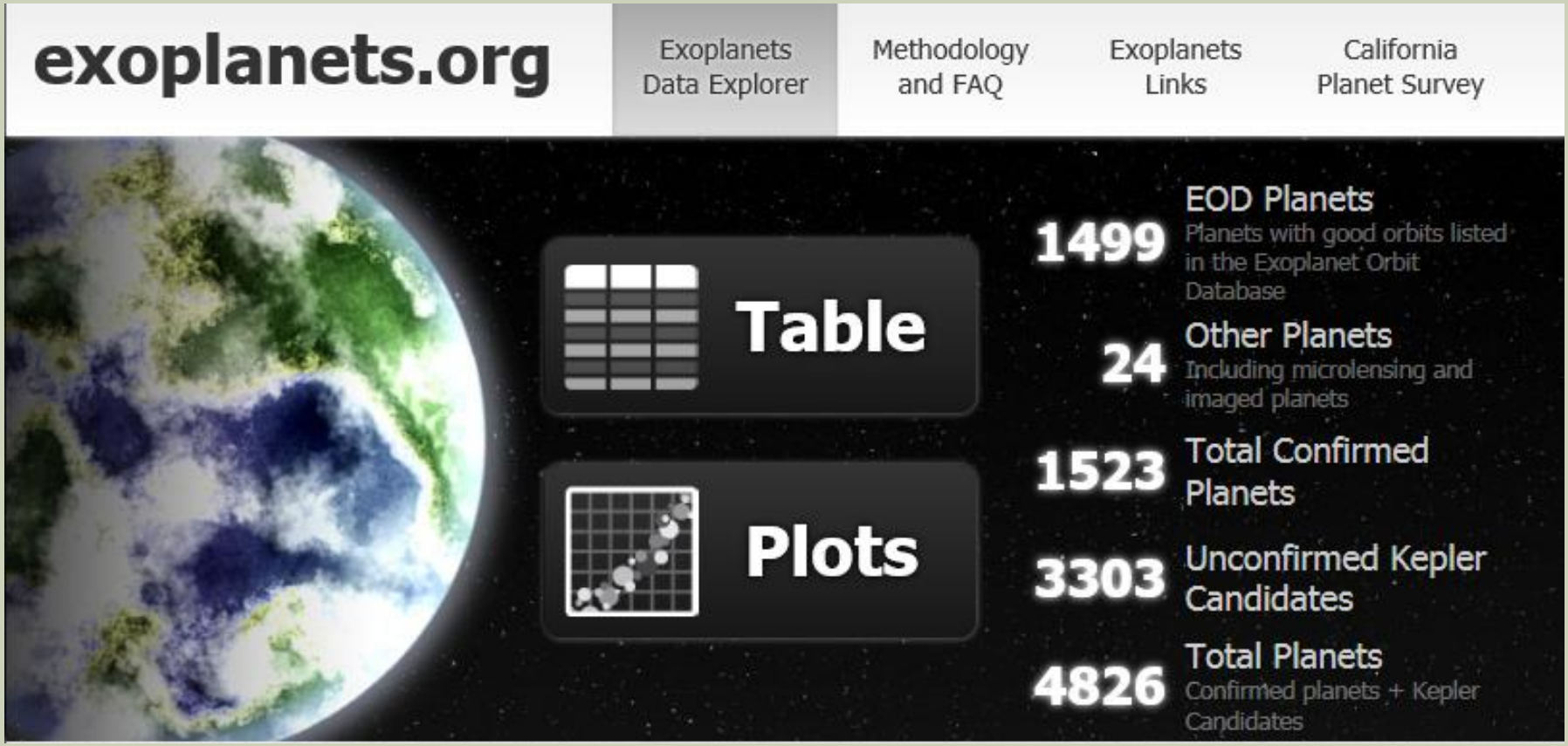
- Grote aantal detecties maakt het mogelijk om statistiek te bedrijven, echter … belangrijk om in de gaten te houden, dat

  de detectiemethodes ook met een bias komen en met beperkingen, en

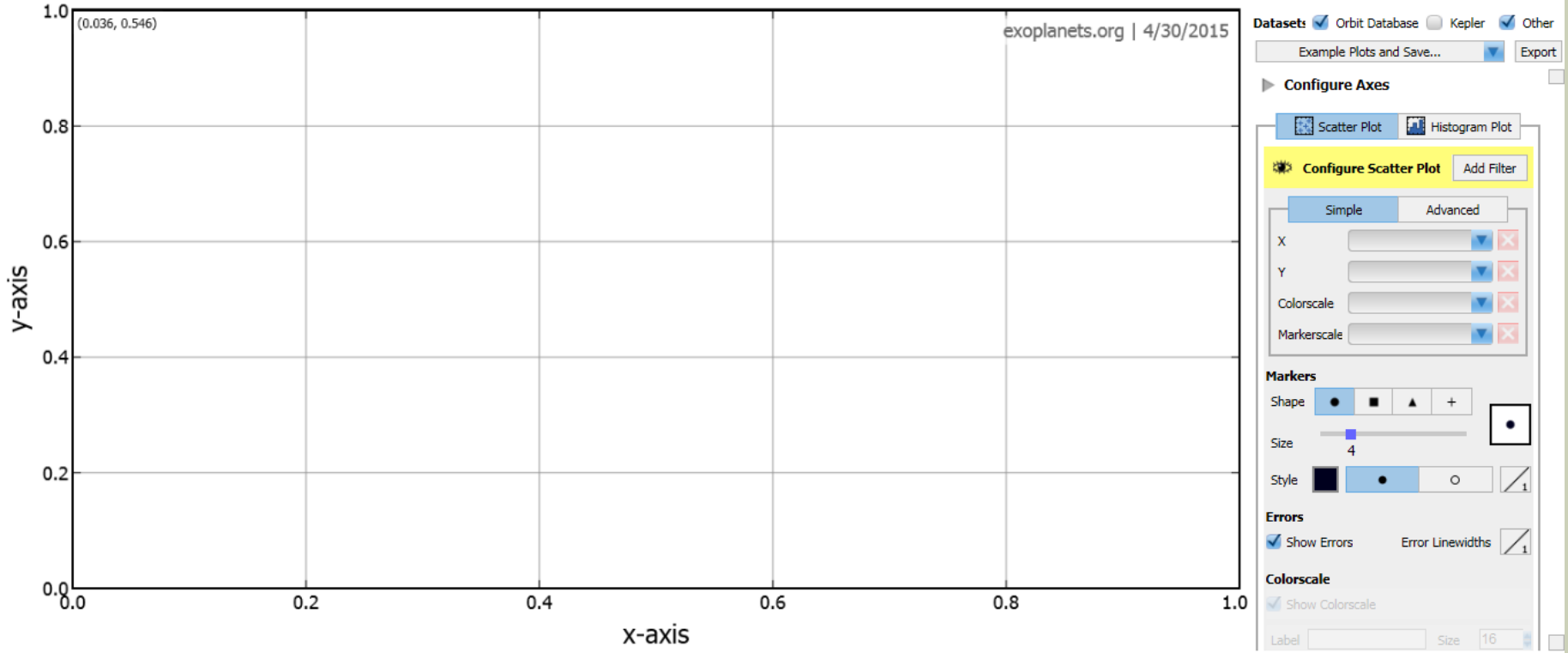
  die statistiek zowel fysisch/chemische informatie als puur waarneemtechnische informatie geeft.

- Grootheden: soort ster (metalliciteit) waar planeet wordt gevonden, massa planeet, afstand planeet-ster, afstand aarde-planeet, excentriciteit baan, aantal planeten om ster, mogelijke resonanties van planeten.

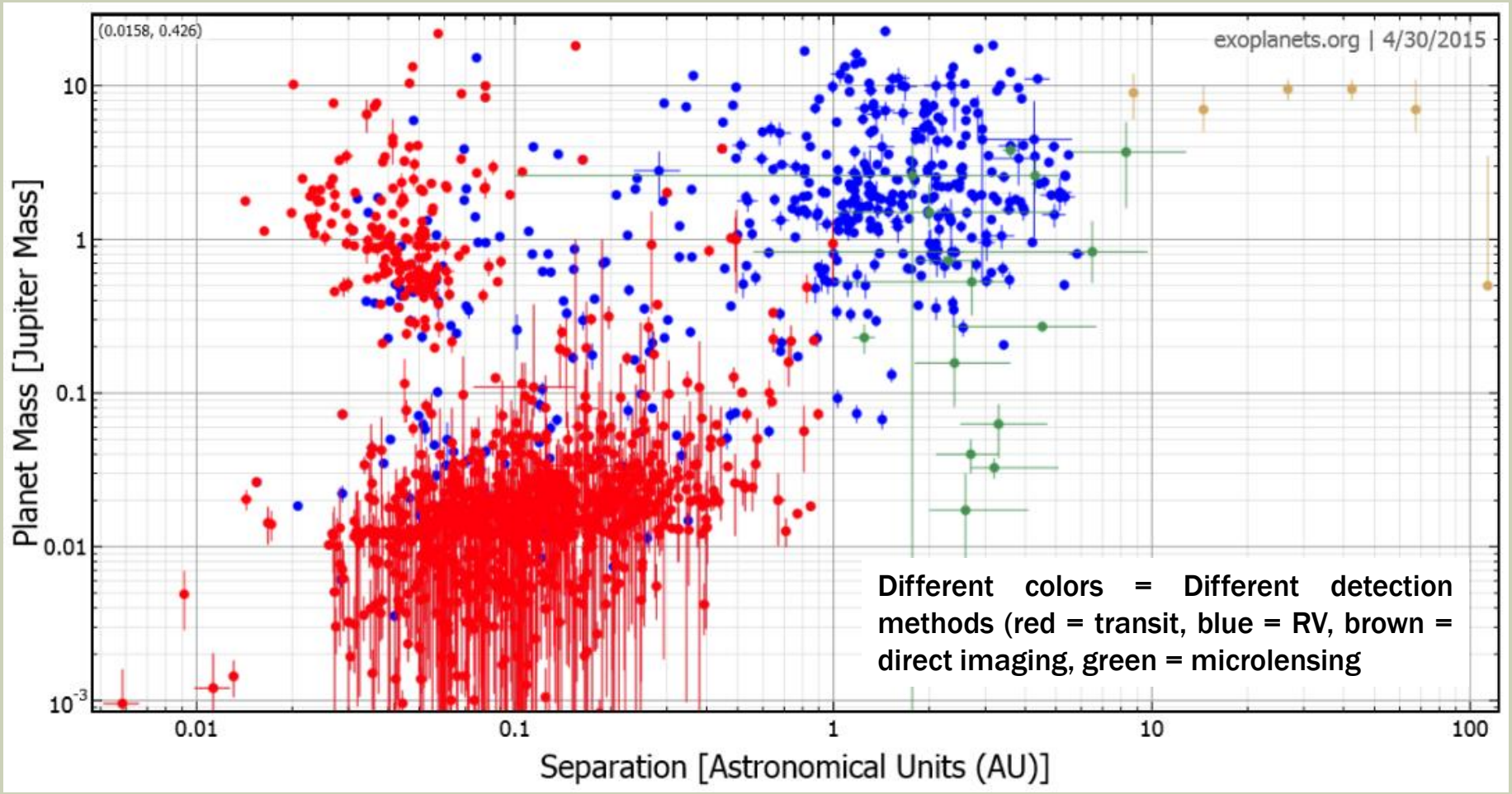
EXOPLANETEN / STATISTIEK



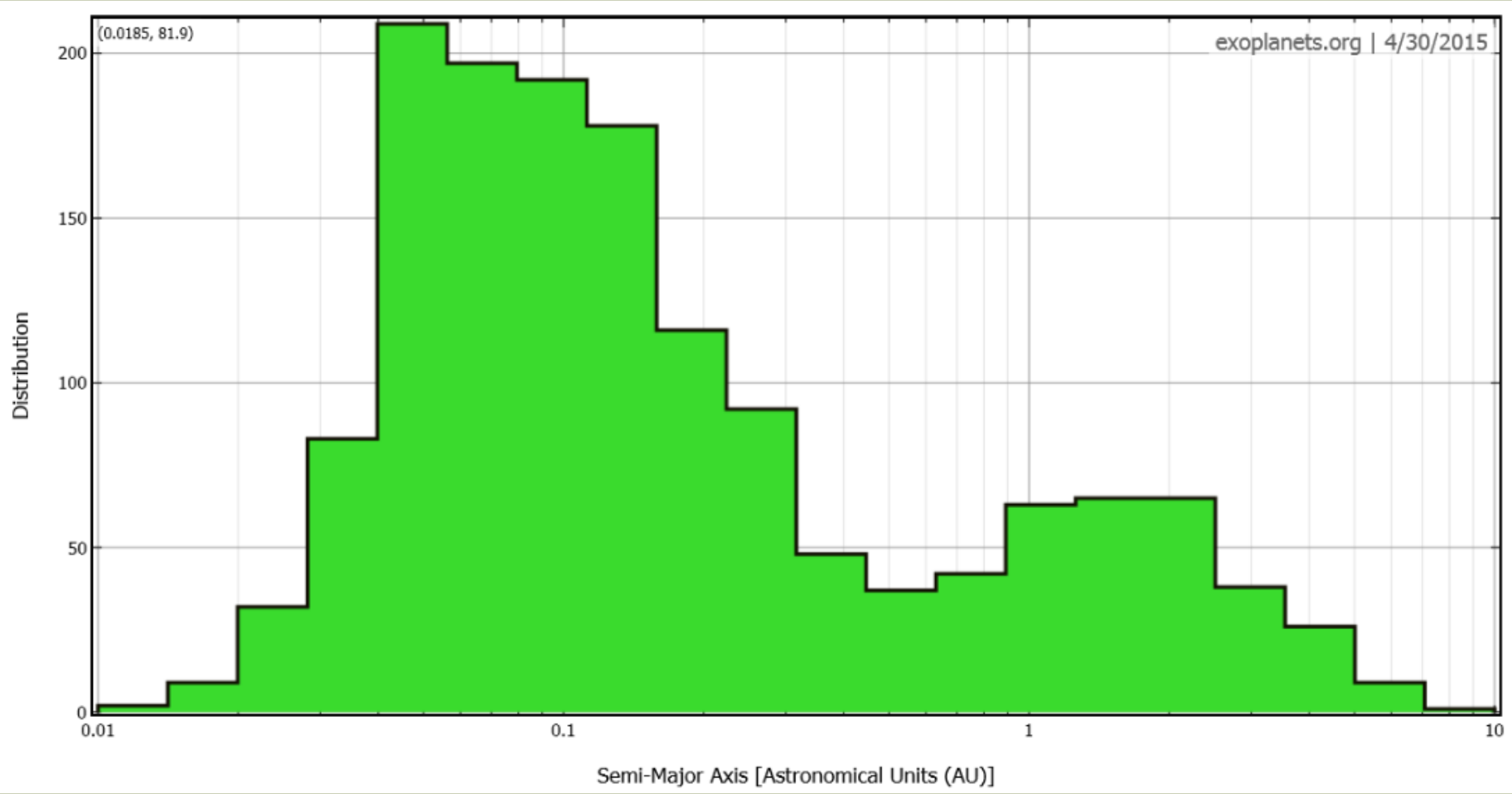
EXOPLANETEN / STATISTIEK / DO IT YOURSELF



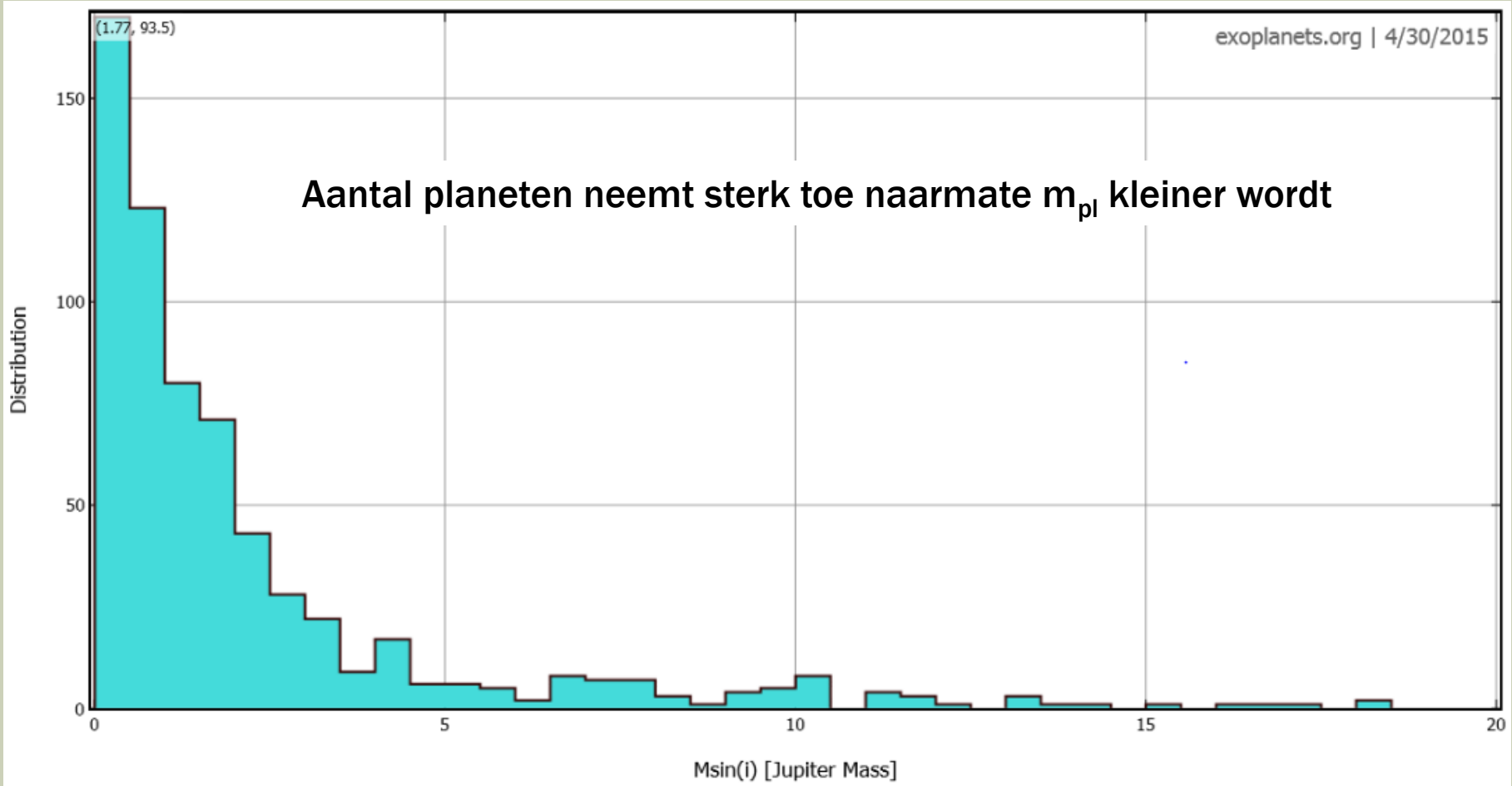
EXOPLANETEN / STATISTIEK
PLANET MASS VS DISTANCE TO STAR



EXOPLANETEN / STATISTIEK AFSTAND PLANEET-STER

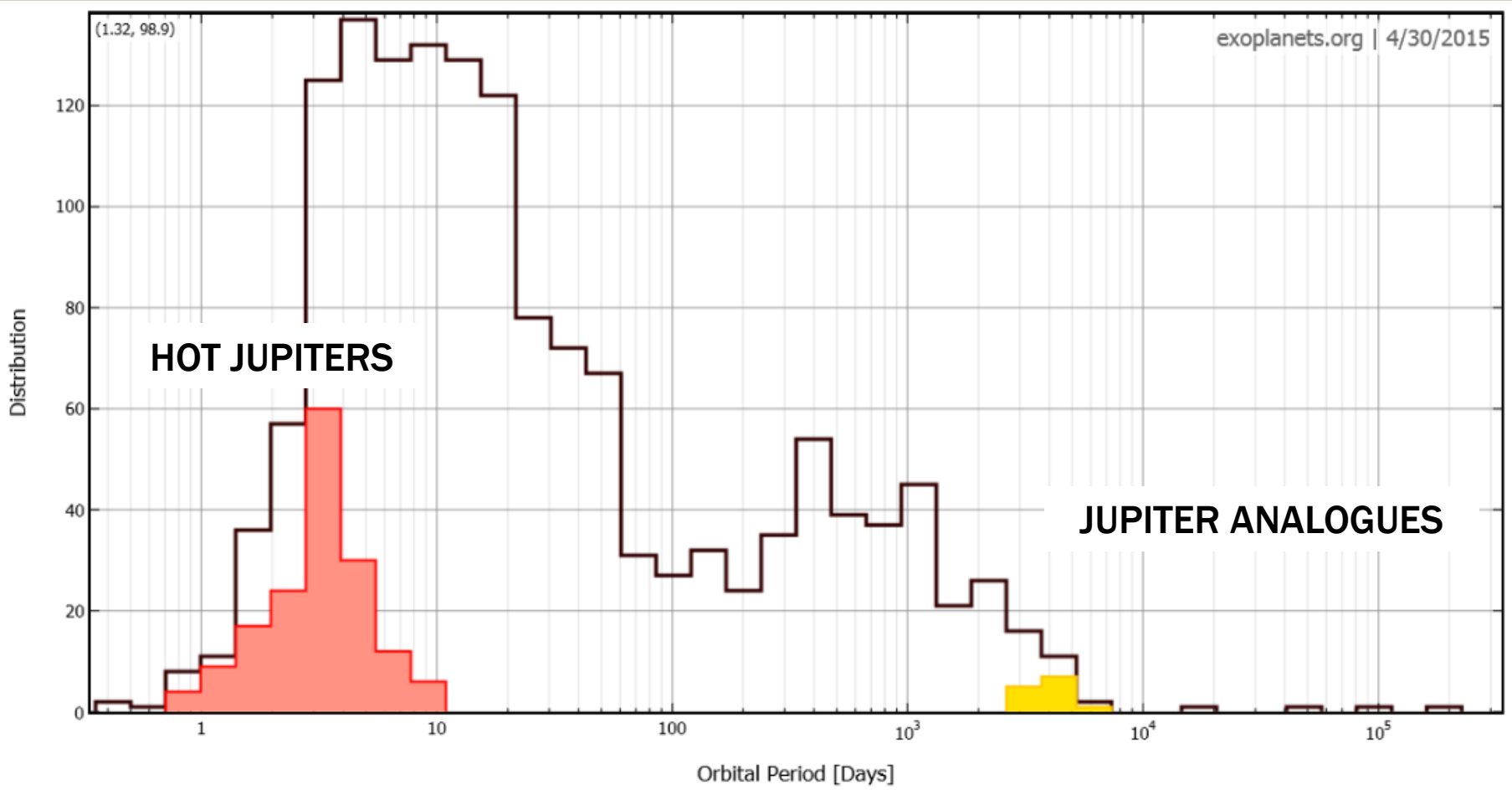


EXOPLANETEN / STATISTIEK
MINIMUM MASSA VERDELING



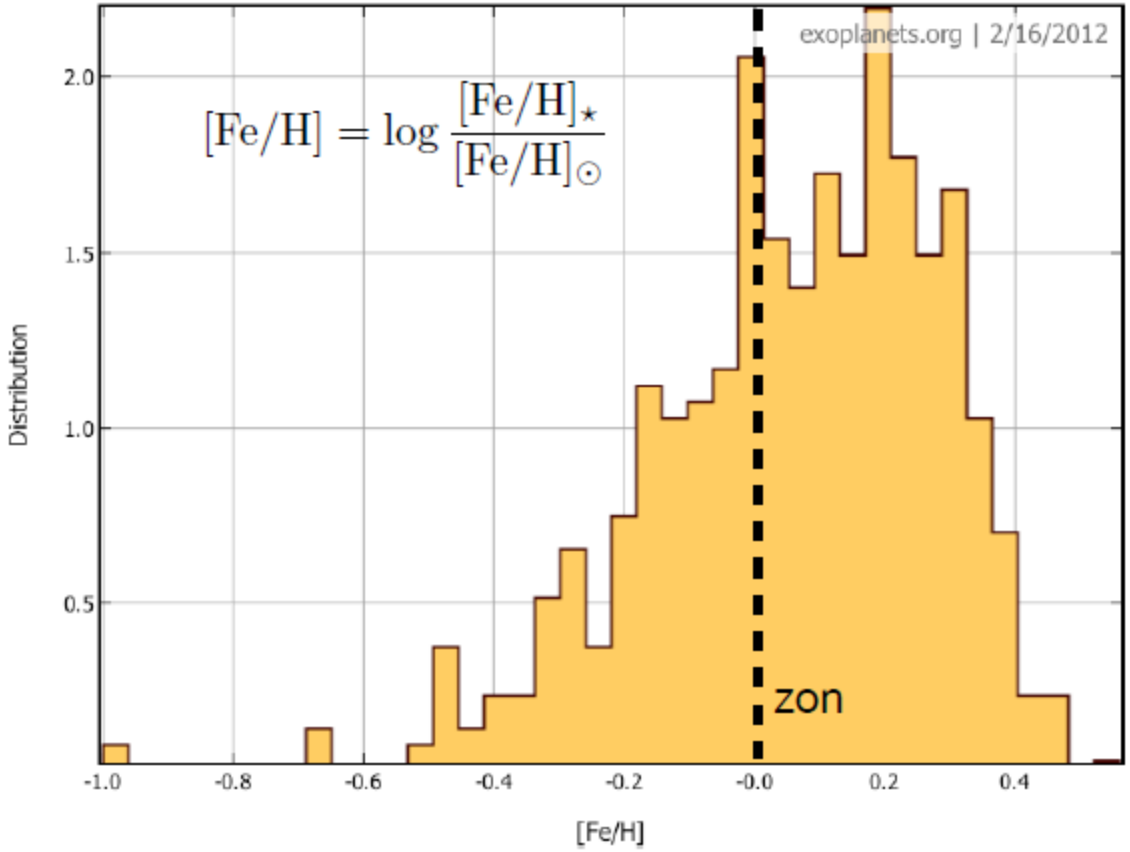
Aantal planeten neemt sterk toe naarmate m_{pl} kleiner wordt

EXOPLANETEN / STATISTEK OMLOOPTIJDEN (SINDS 1995)



EXOPLANETEN / STATISTIEK METALLICITEIT (NIET H OF HE)

- Sterren met een groter gehalte aan elementen zwaarder dan He, hebben vaker een (Jupiter-massa) planeet



TENSLOTTE; EXO-AARDES

- Exo-aardes zijn nog niet ontdekt; wel veel zogenaamde Super-earths, met een massa groter dan die van de aarde maar kleiner dan die van onze ijs reuzen (< 15 aardmassa's).
- Veel nadruk op 'habitable zone', het gebied waar de afstand tot een ster ervoor zorgt dat water bij ongeveer 1 atm vloeibaar voor kan kome; hangt af van soort ster en positie exo-planeet, evenals excentriciteit.
- Bovendien andere factoren: denk aan magneetveld, duur dag, aanwezigheid atmosfeer, broeikasteffect, etc..
- En ook de ster (lees zon) gedraagt zich niet constant: 'faint young Sun paradox': voor een groot deel van de historie was de zon niet lichtkrachtig genoeg om de aarde in de habitable zone te plaatsen.
- Veel complexer dan gedacht.

WWW.HZGALLERY.ORG

DAT WAS HET COLLEGE PLANETENSTELSELS

TENTAMEN 01.06 VAN 14-17 UUR

LOCATIE IN STUDIEGIDS

SCHRIFTELIJK

GEEN OPEN BOEK

REKENMACHINE MEENEMEN

BEKIJK EN BEGRIJP DE HANDOUTS,

GEBRUIK JE KENNIS INLEIDING ASTROFYSICA